

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет інформатики та обчислювальної техніки
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики та управління в технічних системах
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) О.І. Ролік
(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 126. Інформаційні системи та технології
(код і назва спеціальності)

на тему: Адаптивна система керування підводним роботом

Виконав: студент 2 курсу, групи ІА-82мп
(шифр групи)

Бердник Юрій Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові) _____ (підпис)

Науковий керівник доцент каф. АУТС, к.т.н., доцент.

Репнікова Наталія Борисівна
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) _____ (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) _____ (підпис)

Рецензент доцент каф. АСОіУ, к.т.н., доц. Жданова О.Г.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) _____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) Інформатики та обчислювальної техніки _____
(повна назва)

Кафедра Автоматики та управління в технічних системах _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою
інтегровані інформаційні системи

Спеціальність (спеціалізація) 126. Інформаційні системи та технології _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ О.І. Ролік _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Берднику Юрію Михайловичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Тема дисертації Адаптивна система керування підводним роботом _____

науковий керівник дисертації Репнікова Наталія Борисівна, к.т.н., доц. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Підводний робот _____

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) _____

Адаптивна система керування підводним роботом.
Маса підводного робота – 5кг; максимальна глибина занурення – 100м; _
максимальна швидкість маршового руху – 3м/с; висока якість адаптації _
синтезованої системи керування підводним роботом до зміни його _
коефіцієнта підсилення та сталої часу. _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити огляд та аналіз існуючих рішень;
розроблення структурної та функціональної схеми системи керування підводним роботом;
розроблення математичної моделі динаміки підводного робота; моделювання динаміки сил опору
руху підводного робота; моделювання динаміки підводного робота; синтез адаптивної системи
керування підводним роботом; дослідження впливу зміни коефіцієнта підсилення та постійної часу
об'єкта на якість керування; розроблення стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу схема
структурна; схема функціональна; модель динаміки підводного робота; часові характеристики
динаміки підводного робота; часові характеристики адаптивної системи; часові характеристики режиму
роботи двигуна підводного робота; дослідження адаптивної системи керування підводним роботом;
дослідження роботи адаптивної системи керування при одночасній роботі двох маршових двигунів
підводного робота

7. Орієнтовний перелік публікацій Стаття «Розвиток можливостей синтезу
адаптивних систем керування на базі функцій Ляпунова»

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Отримання завдання та узгодження вихідних даних		
2.	Огляд та аналіз існуючих рішень	28.10.2019-30.10.2019	
3.	Розроблення структурної та функціональної схеми системи	31.10.2019-02.11.2019	
4.	Розроблення математичної моделі динаміки підводного робота	03.11.2019-06.11.19	
5.	Моделювання динаміки підводного робота	07.11.2019-10.11.2019	
6.	Синтез адаптивної системи керування	11.11.2019-14.11.2019	
7.	Дослідження якості синтезованої адаптивної системи керування	15.11.2019-17.11.2019	
8.	Розроблення стартап-проекту	18.11.2019-23.11.2019	
9.	Оформлення дисертації	25.11.2019-02.12.2019	
10.	Подання дисертації до попереднього захисту	03.12.2019	

Студент

(підпис)

Ю.М. Бердник

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Н.Б. Репнікова

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на здобуття ступеня «магістр» за освітньо-професійною програмою підготовки «Інтегровані інформаційні системи» на тему «Адаптивна система керування підводним роботом». Дисертація містить 109 сторінок, 31 рисунок, 26 таблиць, 1 додаток, 27 джерел.

Актуальність. Останнім часом сфера застосування сучасних підводних роботів значно розширилася. Вони здатні вирішувати широкий спектр задач у різних сферах застосування: складні та небезпечні у недоступних для людини місцях, військові, комерційні, науково-дослідні, пошукові та рятувальні. Тому задача розроблення адаптивної системи керування підводним роботом складна та актуальна.

Метою магістерської дисертації є підвищення ефективності функціонування підводного робота.

Об'єкт дослідження: підводний робот.

Предмет дослідження: адаптивна система керування підводним роботом.

Наукова новизна одержаних у магістерській дисертації результатів полягає у вдосконаленні відомого метод синтезу самоналагоджувальних систем керування з еталонною моделлю на базі функцій Ляпунова шляхом включення ПІД-контролера у прямий канал керування.

Апробація результатів дисертації. За результатами роботи було опубліковано статтю:

Репнікова Н. Б. Розвиток можливостей синтезу адаптивних систем керування на базі функцій Ляпунова / Н.Б. Репнікова, Ю.М. Бердник // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2019. — №8. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-8-4986>.

Ключові слова: ПІДВОДНИЙ РОБОТ, СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, АДАПТИВНА СИСТЕМА, САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНА СИСТЕМА, ЕТАЛОННА МОДЕЛЬ, ПІД-КОНТРОЛЕР, ПРЯМИЙ МЕТОД СТІЙКОСТІ ЛЯПУНОВА, ФУНКЦІЇ ЛЯПУНОВА.

ABSTRACT

Master's dissertation on the educational-professional level training program "Master" on the theme "Underwater robot adaptive control system". The dissertation contains 109 pages, 31 figures, 26 tables, 1 application, 27 sources.

Relevance. Recently, the scope of modern underwater robots has expanded significantly. They are capable of solving a wide range of tasks in a variety of applications: complex and dangerous in unreachable places, military, commercial, research, search and rescue. Therefore, the task of developing an underwater robot adaptive control system is complex and relevant.

The goal of is to increase the efficiency of the underwater robot's operation.

Object of research: underwater robot.

Subject of research: underwater robot adaptive control system.

The scientific novelty of the results obtained in the master's thesis is improvement of the known method of synthesis of self-adjusting control systems with the reference model based on Lyapunov functions by incorporating a PID controller in a direct control channel. Testing the results of the thesis. According to the results of the work, an article was published:

Репнікова Н. Б. Розвиток можливостей синтезу адаптивних систем керування на базі функцій Ляпунова / Н.Б. Репнікова, Ю.М. Бердник // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2019. — №8. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-8-4986>.

Keywords: UNDERWATER ROBOT, CONTROL SYSTEM, ADAPTIVE SYSTEM, SELF-ADJUSTING SYSTEM, REFERENCE MODEL, PID-CONTROLLER, DIRECT LYAPUNOV STABILITY METHOD, LYAPUNOV FUNCTIONS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ	12
1.1 Загальна характеристика сучасних підводних роботів та сфер їх застосування	12
1.1.1 Підводні пошукові та обстежувальні роботи.....	12
1.1.2 Обстеження чи будівництво протяжних підводних об'єктів	13
1.1.3 Геологічна розвідка та картографування дна	15
1.1.4 Океанографічні дослідження та моніторинг вод.....	15
1.1.5 Дослідження та роботи під льодом	16
1.1.6 Наукові та екологічні дослідження	17
1.1.7 Військові застосування підводних роботів	19
1.2 Класифікація сучасних підводних роботів.....	20
1.3 Огляд сучасних наукових та комерційних розробок підводних роботів.....	22
1.3.1 Підводний робот Geneinno Titan 150M.....	22
1.3.2 Підводний робот SoFi.....	23
1.3.3 Підводний робот REMUS-100	25
1.3.4 Порівняльний аналіз розглянутих сучасних підводних роботів..	26
1.4 Аналіз систем керування сучасних підводних роботів.....	26
Висновки до розділу 1	28
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ РОБОТОМ	30
Висновки до розділу 2	35
3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ РОБОТОМ	36
3.1 Структура та функціонування підсистеми керування рухом та положенням підводного робота.....	36

3.2	Структура та функціонування підсистеми зйомки та керування зйомкою.....	37
3.3	Структура та функціонування підсистеми вимірювань.....	38
3.4	Структура та функціонування підсистеми керування маніпулятором .	38
3.5	Функціонування підсистеми мікроконтролера та робота в цілому	39
	Висновки до розділу 3	40
4	РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДВОДНОГО РОБОТА ..	41
4.1	Математична модель взаємодії гвинта підводного робота з водою	41
4.2	Дослідження функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання валу двигуна	43
4.2.1	Квадратична апроксимація функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання валу двигуна	43
4.2.2	Лінеаризація функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання валу двигуна	44
4.3	Математична модель маршових двигунів підводного робота	45
4.3.1	Вибір маршових двигунів підводного робота.....	45
4.3.2	Математична модель двигуна постійного струму.....	45
4.4	Зв'язок сили тяги маршових двигунів із швидкістю руху підводного робота	48
4.5	Отримання передавальної функції підводного робота за швидкістю руху	49
	Висновки до розділу 4	50
5	МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДВОДНОГО РОБОТА	52
5.1	Моделювання динаміки двигунів підводного робота	52
5.2	Моделювання динаміки взаємодії гвинта підводного робота із навколишньою водою	55
5.3	Моделювання динаміки сил опору руху підводного робота.....	57
5.4	Моделювання динаміки підводного робота.....	58

Висновки до розділу 5	63
6 РОЗРОБЛЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ РОБОТОМ.....	64
6.1 Синтез адаптивної системи керування на базі функцій Ляпунова відомим методом	64
6.2 Синтез адаптивної системи керування на базі функцій Ляпунова запропонованим методом.....	67
Висновки до розділу 6	68
7 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ СИНТЕЗОВАНОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	69
7.1 Дослідження впливу зміни коефіцієнта підсилення об'єкта на якість керування	69
7.2 Дослідження впливу зміни постійної часу об'єкта на якість керування.....	72
7.3 Дослідження впливу одночасної зміни як постійної часу, так і коефіцієнта підсилення об'єкта на якість керування	74
7.4 Дослідження роботи двигуна та якості процесів керування на моделі реального підводного робота	76
7.5 Дослідження роботи адаптивної системи керування при одночасній роботі двох маршових двигунів підводного робота.....	79
Висновки до розділу 7	81
8 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПІДВОДНИЙ РОБОТ»	82
8.1 Опис ідеї стартап-проекту.....	82
8.2 Технологічний аудит ідеї стартап-проекту	85
8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	86
8.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	97
8.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	101
Висновки до розділу 8	104
ВИСНОВКИ.....	105

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	106
ДОДАТОК А Перелік опублікованих матеріалів	110

ВСТУП

Останнім часом сфера застосування сучасних підводних роботів значно розширилася. Вони здатні вирішувати широкий спектр задач у різних сферах застосування: складні та небезпечні у недоступних для людини місцях, військові, комерційні, науково-дослідні, пошукові та рятувальні. Але через наявність приєднаної маси та моменту інерції води, коефіцієнт підсилення та постійна часу підводного робота постійно змінюються, що значно ускладнює процес високоякісного керування підводним роботом. Тому задача розроблення адаптивної системи керування підводним роботом складна та актуальна.

Мета: підвищення ефективності функціонування підводного робота.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні **задачі:**

- огляд та аналіз існуючих рішень, зокрема сучасних наукових та комерційних розробок підводних роботів та їх систем керування;
- розроблення структурної та функціональної схеми системи керування підводним роботом;
- розроблення математичної моделі динаміки підводного робота;
- дослідження функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання двигуна підводного робота;
- моделювання динаміки двигунів підводного робота;
- моделювання динаміки взаємодії гвинта підводного робота із навколишньою водою;
- моделювання динаміки сил опору руху підводного робота;
- моделювання динаміки підводного робота;
- синтез адаптивної системи керування на базі функцій Ляпунова відомим методом;
- синтез адаптивної системи керування на базі функцій Ляпунова запропонованим методом;

- дослідження впливу зміни коефіцієнта підсилення об'єкта на якість керування;
- дослідження впливу зміни постійної часу об'єкта на якість керування;
- дослідження впливу одночасної зміни як постійної часу, так і коефіцієнта підсилення об'єкта на якість керування;
- дослідження якості процесів керування на моделі реального підводного робота;
- дослідження роботи адаптивної системи керування при одночасній роботі двох маршових двигунів підводного робота.

Для вирішення задач магістерської дисертації використовувались наступні

методи:

- методи побудови математичних моделей;
- методи апроксимації та лінеаризації;
- методи теорії автоматичного керування;
- метод перетворення Лапласа;
- апарат передавальних функцій;
- метод моделей простору станів;
- метод комп'ютерного моделювання;
- методи синтезу регуляторів;
- прямий методом стійкості Ляпунова;
- методи розрахунку ПД-контролерів;
- методи мінімізації критеріїв ISE, IAE, ITAE, ITSE;
- методи аналізу якості.

Об'єктом дослідження є підводний робот, а **предметом** – адаптивна система керування підводним роботом.

Апробація результатів дисертації. За результатами роботи було опубліковано статтю:

Репнікова Н. Б., Бердник Ю. М. Розвиток можливостей синтезу адаптивних систем керування на базі функцій Ляпунова // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2019. — №8. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-8-4986>.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Загальна характеристика сучасних підводних роботів та сфер їх застосування

Підводні роботи здатні вирішувати широкий спектр задач у різних сферах застосування: складні та небезпечні у недоступних для людини місцях, військові, комерційні, науково-дослідні, пошукові та рятувальні. Кожна сфера застосування та умови експлуатації підводних апаратів визначають вимоги до їх технічних, економічних та експлуатаційних характеристик, без детального аналізу яких неможливо спроектувати підводний робот, який буде здатний успішно вирішувати поставлені йому задачі. Розглянемо типові сфери застосування підводних роботів.

У монографії [1] розглядаються наступні сфери застосування підводних роботів:

- підводні пошукові та обстежувальні роботи;
- обстеження чи будівництво протяжних підводних об'єктів;
- геологічна розвідка та картографування дна;
- дослідження під льодом;
- океанографічні дослідження та моніторинг вод;
- наукові та екологічні дослідження;
- військові.

Також, як показує аналіз сучасного ринку підводних роботів, останнім часом відносно немало його частину складають роботи для аматорської підводної зйомки, риболовлі та інших некомерційних застосувань у аматорській практиці. Це, у свою чергу, дозволяє виділити ще одну сферу застосування підводних роботів – розважальну.

1.1.1 Підводні пошукові та обстежувальні роботи

Оглядово-пошукові та обстежувальні підводні роботи історично були першою сферою застосування підводних апаратів. Спочатку їх застосовували в основному для ехолокаційної чи фотографічної зйомки дна з метою проведення різних вимірювань, а також пошуку чи виявлення затонулих об'єктів [1].

Сучасні підводні роботи в оглядово-пошуковій та обстежувальній сфері здатні виконувати дуже широкий спектр задач, включаючи пошук та обстеження затонулих об'єктів, обстеження штучних підводних споруд, геологічну розвідку та картографування дна. Для спроможності виконувати описані вище задачі, підводний робот повинен мати навігаційне забезпечення та засоби технічного зору, геофізичні датчики та датчики параметрів навколишнього середовища, а також робочі виконавчі механізми. Одночасно для виконання підводним роботом вище описаних задач повинні бути забезпечені: попередній огляд району виконання пошуково-обстежувальних робіт із нанесенням цілей для детального обстеження та виведення апарата на район пошуку [1]. А робот у свою чергу повинен забезпечувати оперативну обробку, передачу та (або) збереження накопиченої інформації.

Як правило, у підводних роботах у якості навігаційних засобів та засобів технічного зору використовують гідроакустичні навігаційні системи, гідролокатори, ехолоти, акустичні профілографи, системи електромагнітного та магнітометричного пошуку, а також теле- та фотокамери [1].

Типовими прикладами підводних апаратів пошукового класу є такі відомі підводні апарати як американський «AUSS» (Advanced Unmanned Search) чи його дистанційно керований попередник «CURV» (Cable-controlled Undersea Recovery Vehicle).

Апарати такого класу можуть мати масу від кількох кілограм до 8т, мають час автономної роботи від кількох годин до близько 60 годин та можуть працювати на глибинах до 4-6км.

1.1.2 Обстеження чи будівництво протяжних підводних об'єктів

Під будівництвом підводних протяжних об'єктів слід розуміти будівництво підводних трубопроводів, нафтопроводів, водопроводів, тунелів, а також прокладку кабелів під водою.

Останнім часом значно підвищується інтенсивність застосування автономних підводних робіт у комерційних проектах з будівництва та моніторингу підводних нафто- та газопроводів, а також прокладки підводних кабелів у місцях із дуже небезпечним водним та техногенним середовищем, а також у місцях, зовсім недоступних для водолазів [2].

Крім того, будівництво підводного трубопроводу автономним підводним роботом може бути у кілька разів дешевше, ніж при використанні телекерованих підводних апаратів [1, 2]. Також застосування підводних робіт є одним із найбільш перспективних способів вирішення актуальної задачі постійної інспекції трубопроводів на наявність витоку в нафтогазовій промисловості [1,2,3].

Таким чином підводний робот, який застосовується у сфері обстеження протяжних підводних об'єктів повинен забезпечувати, насамперед, визначення положення трубопроводу, виявлення та вимірювання провисань трубопроводу, перевірку стану його покриття та виявлення наявності корозії та пошкоджень самого трубопроводу чи з'єднань його частин, а також виявлення витоку транспортованих речовин [1].

Очевидно, що для вирішення вищеописаних задач, підводний робот повинен бути обладнаний спеціальними давачами. А при застосуванні підводного робота для будівництва підводних трубопроводів він повинен мати ще й ряд спеціальних робочих виконавчих механізмів, зокрема різних маніпуляторів, а також бути обладнаним засобами для підводного зварювання та виконання інших операцій з будівництва трубопроводів [3].

Відомими прикладами масштабних проектів з будівництва підводних трубопроводів є проекти з використанням японських підводних апаратів «AE-1000», французьких багатофункціональних підводних апаратів «ALISTAR» чи шотландських «GEOSUB» [1].

1.1.3 Геологічна розвідка та картографування дна

Як відомо, основним завданням геологічної розвідки є виявлення покладів корисних копалин, зокрема як на шельфах морів так і на дні океанів. Відомі приклади застосування підводних апаратів «Hugin» норвезької фірми Simrad для забезпечення нафтової розвідки та обслуговування бурових платформ на глибині до 600м [1]. Підводні роботи «Hugin» уже досить довго і широко використовуються в галузі морської геологічної розвідки, зйомки та картографування океанічного дна, а також батиметричної зйомки та складання батиметричних карт, тому фірма Simrad є однією з найвідоміших та має значний досвід у даній галузі.

Підводні роботи цього класу, крім безпосередньо геологічної розвідки можуть вирішувати, пов'язані з нею актуальні наукові задачі геомагнітної та гравіметричної зйомки, акустичного профілювання дна, зйомки геологічних розломів та спостереження за процесами вулканічної діяльності, що становить основу дослідження природних аномальних явищ та активних геологічних утворень океанського дна [1].

1.1.4 Океанографічні дослідження та моніторинг вод

Як відомо, океанографія вивчає широкомасштабні фізичні, хімічні чи біологічні довготривалі процеси у Світовому океані. Зрозуміло, що настільки широкомасштабне вимірювання параметрів, як в товщі вод, так і поблизу дна, необхідне для океанографічних досліджень, є досить складною задачею і ставить свої специфічні вимоги до підводного робота.

Підводні роботи цього типу використовуються для вивчення широкомасштабних океанічних структур, активних придонних джерел, гідротермалей. За допомогою таких підводних роботів можна здійснювати акустичну томографію окремих океанічних об'єктів, а також моніторинг параметрів

води, вивчення процесів припливів та відпливів та океанічної глибинної конвекції [1].

Для вирішення вищеописаних задач робот повинен крім здатності до високоточних вимірювань з точною навігаційною прив'язкою, повинен ще й мати можливість рухатися по заданій мережі траєкторій для спостереження дійсного розподілу параметрів водного середовища та оперативного моніторингу цих параметрів із подальшим їх документуванням.

Типовими прикладами таких підводних роботів є розробка Массачусетського технологічного інституту «Odyssey», «Ocean Explorer» та «Ocean Voyager» Флоридського океанографічного університету, «REMUS» океанографічного університету Woods Hole [1]. Автономні підводні роботи сімейства «REMUS» є одними із найбільш доступних і ефективних апаратів даного класу.

1.1.5 Дослідження та роботи під льодом

Підльодові підводні роботи допомагають забезпечити наукові дослідження у полярних широтах. Такі умови експлуатації накладають цілий ряд особливих вимог до конструкції підводного робота, його бортових систем та надійності. За експлуатації робота в таких умовах відсутня можливість застосування буїв, що плавають на поверхні води, що накладає високі вимоги до точності автономного навігаційного обладнання робота, та вимагає установки контрольних баз із дротовими акустичними маяками і пунктами телеметричного зв'язку на шляху підльодового робота.

Також роботи, здатні працювати під льодом, знаходять застосування і в усіх інших сферах застосування підводних роботів, де пошукові, обстежувальні чи роботи з будівництва протяжних об'єктів потрібно виконувати у водах під льодом. Так, відомі приклади застосування канадського підводного робота «Theseus», розробленого компанією ISE (International Submarine Engineering), для прокладки

оптичного кабелю довжиною понад 200км, на глибинах до 450м під льодами Арктики у 1996р [1].

1.1.6 Наукові та екологічні дослідження

У сучасних умовах, важливим є постійний моніторинг екологічного стану вод як морів та океанів, так і річок, озер, ставків та водосховищ. Важливою та актуальною є задача охорони портів, яка полягає у своєчасному виявленні забруднень від суден та портових споруд та вживання відповідних заходів, тому цю сферу також не оминуло застосування підводних роботів [1].

Для виконання екологічного моніторингу вод потрібне постійне здійснення вимірювань фізичних, хімічних і біологічних параметрів контрольованої води. Для оперативного виявлення джерел забруднення, здійснення екологічних прогнозів та уникнення негативних екологічних наслідків, необхідне ще й картографування даних моніторингу та їх оперативний аналіз. Очевидно, що це накладає певні вимоги до функціональності підводного робота: він повинен мати всі необхідні датчики та забезпечувати оперативну передачу результатів вимірювань, а також достатньо швидко переміщатися по всіх контрольних точках зони моніторингу, щоб встигати відобразити динаміку зміни стану вод на всій контрольованій території.

Сучасні підводні роботи здатні оцінювати гідрохімічний та гідрофізичний стан води вимірюючи вміст кисню, солоність, рН та прозорість, температуру, електропровідність води. Для оцінки ж гідробіологічного стану водойми підводні роботи можуть проводити оцінку мутності, освітленості, вмісту кисню та хлорофілу, а також оцінку об'ємної густини розподілу мікроводоростей у товщі води. Одночасно сучасні підводні роботи можуть бути обладнані спеціальними касетними пробовідбірниками для взяття проб води та подальшого їх дослідження в лабораторії [1].

Останнім часом для задач екологічного моніторингу застосовують системи роботів. Так, у роботі [4] запропоновано систему із двох роботів: автономного

підводного робота та автономного поверхневого робота, які співпрацюють між собою. Підводний робот проводить вимірювання забрудненості води в реальному часі, а робот на поверхні води забезпечує навігацію системи та зв'язок із центром моніторингу, де оператор може змінити траєкторію руху системи роботів у випадку необхідності. У 2015р розробники системи отримали гарні результати контролю рівня штучного забруднення вод спеціальним нешкідливим флуоресцентним барвником (родаміном) при експериментальних дослідженнях розробленої системи у відкритому морі біля берегів Іспанії [4].

При потребі моніторингу екологічного стану вод на великих територіях можуть використовуватись цілі мережі систем підводних роботів з поверхневими буями або «роями» повітряних буїв. Буї такої системи можуть бути здатні до колективної роботи та спільного виконання завдань [5].

Для розширення сфери застосування, підвищення універсальності та автономності систем підводного робота та буя проектують підводні роботи із змінними наборами датчиків та встановлюють додаткові акумулятори та сонячні елементи живлення у поверхневих буюх [6].

Також варто зазначити, що до наукової сфери можна віднести і біонічні підводні роботи, які імітують зовнішній вигляд та поведінку підводних мешканців, зокрема риб, що дозволяє вивчати підводні екосистеми та природну поведінку деяких видів риб непомітно для них. Прикладом такого робота є робот-риба, спроектований лабораторією комп'ютерних наук та штучного інтелекту Массачусетського технологічного інституту у 2018 році. Цей робот успішно використовувався для дослідження коралових рифів у Тихому океані [7].

Ще одним прикладом екологічного застосування підводних роботів є застосування робота, спроектованого Університетом Квінсленда, для регулювання популяції морських зірок [8].

1.1.7 Військові застосування підводних роботів

Більшість із описаних вище задач, які вирішуються підводними роботами можуть бути використані у військових цілях.

Підводні роботи військового призначення можуть застосовуватись для протичовнової розвідки, патрулювання, забезпечення безпеки підводної військової техніки, пошуку та знешкодження мін, а також створення систем спостереження та висвітлення підводної обстановки [1].

Протимінний підводний робот здійснює виявлення мін за допомогою спеціальної гідроакустичної станції, установленної на ньому [9,10]. При цьому робот повинен ще й рухатися оптимальною траєкторією, щоб пройшовши мінімальний шлях, виявити всі міни [10]. Такий робот забезпечує ідентифікацію міни або власними засобами, або відправивши гідроакустичні або (та) фотознімки міни оператору. Роботи цього класу можуть бути або дистанційно керованими, або повністю автономними. Дистанційно керовані роботи зв'язані дротом із човном-носієм. Автономні ж роботи цього класу, як правило, лише зрідка піднімаються на поверхню, щоб уточнити свої географічні координати та передати дані про виявлені міни [9]. Наступний етап – знищення міни, може відбуватись двома шляхами. У першому випадку підводний робот, обладнаний спеціальним маніпулятором, скидає до міни дистанційно керований підривний заряд. Очевидно, що в цьому випадку робот повинен бути досить маневреним та гарно керованим та тихохідним, щоб при наближенні до міни випадково не активувати її. У другому випадку одноразовий підводний робот, знищуючи міну, підривається разом з нею [9].

Відомим прикладом підводних роботів військового призначення є апарат «REMUS-100», що перебуває на озброєнні США, Нідерландів та Сінгапуру [9]. Однак, даний робот не є лише роботом військового призначення і може використовуватись також і для океанографічних досліджень та моніторингу вод [1]. Відомими також є автономні апарати «Bluefin-12», «Sea Talon», «GAVIA», «Ariel-II», що перебувають на озброєнні США [9].

Автономні підводні роботи військового призначення мають масу від одиниць кілограмів (4,5кг - «Sea Talon») до майже тонни (650кг – норвезький «Hugin 1000»). Максимальна глибина занурення таких роботів складає від 10м («Sea Talon») до 1000м («Hugin 1000»), а максимальна швидкість ходу до 9км/год. Час автономної роботи таких роботів складає від кількох годин до 70 годин («REMUS-600») [9].

Розміри і маса дистанційно керованих військових підводних апаратів можуть бути значно більшими і досягати майже 10т, наприклад, американський «AN/WLD–1» має масу 7,3т та з'єднаний із судном-носієм дротом довжиною близько одного кілометра [9].

1.2 Класифікація сучасних підводних роботів

Найбільш загальна класифікація підводних апаратів передбачає їх поділ на **пілотовані підводні апарати та безпілотні підводні апарати**. До пілотованих підводних апаратів відносяться підводні човни та батискафи. В англomовній літературі для позначення пілотованих апаратів типу підводних човнів застосовуються терміни DSV (deep-submergence vehicle) чи DSRV (deep-submergence rescue vehicle). Підводні роботи при їх класифікації відносять до безпілотних підводних апаратів, які ще носять назву підводних дронів чи UUV (unmanned underwater vehicles). У наш час цей клас роботів поділяється на два класи: **автономні підводні апарати** або AUV (autonomous underwater vehicle) та **дистанційно-керовані підводні апарати** або ROV (remotely operated underwater vehicles) [11].

Дистанційно-керовані підводні апарати зв'язані дротом з пультом оператора на березі чи надводному судні-носії. Такі апарати знаходять своє застосування майже в усіх, розглянутих вище сферах застосування підводних апаратів, особливо у сфері будівництва підводних трубопроводів, прокладання підводних кабелів, у сфері геологічної розвідки, океанографії та виявлення підводних мін. Апарати цього типу,

як правило, мають більшу масу, можуть транспортувати більші вантажі, а також здатні працювати на більших глибинах.

Автономні підводні роботи останнім часом знаходять все ширше застосування в усіх розглянутих галузях можливого застосування підводних апаратів, зокрема там, де немає необхідності транспортувати величезні вантажі чи переміщатись на великі відстані за судном-носієм. Крім того підводні роботи мають цілий ряд переваг: вони можуть проникати у недоступні для великих пристроїв місця, їх легше зберігати, транспортувати, вони більш маневрені та виконують роботи без втручання людини.

Наступна ознака класифікації – **сфера застосування**. Сумуючи попередній аналіз можна поділити підводні роботи за цією ознакою на: роботи, призначені для проведення оглядово-пошукових робіт, обстеження чи будівництва протяжних підводних об'єктів, зокрема підводних трубопроводів, чи укладки підводних кабелів, робіт геологічної розвідки і картографування дна, а також геологічних, океанографічних, екологічних та наукових досліджень, робіт, призначених для певних робіт під льодом та роботи військового призначення. Останнім часом підводні роботи знаходять своє застосування у розважальній сфері, зокрема для аматорської підводної зйомки. Це дозволяє віднести їх до окремого класу за сферою застосування і виділити розважальну сферу застосування підводних роботів. Стрімкий розвиток технологій останнім часом дозволяє проектувати підводні роботи на стільки технологічно оснащеними, що вони здатні працювати у кількох галузях, тому існують багатоцільові або універсальні роботи. Окремої уваги заслуговує клас біонічних підводних роботів, які з'явились останнім часом. Такі пристрої в основному належать до наукової сфери. Деякі з розглянутих сфер застосування підводних роботів можна об'єднати в одну та класифікувати їх за призначенням як: цивільні, військові, науково-дослідні та подвійного призначення [11,12].

Як видно з розглянутих у попередньому підрозділі прикладів, видно, що маса різних типів підводних роботів коливається від одиниць кілограм до майже 10т.

Тому, існує класифікація за **масою**: мікро-, міні-, легкі, середні та важкі. Така класифікація умовна і кожен діапазон не має чітко визначених меж. Але очевидно, що підводні мікророботи знаходяться на початку діапазону можливих мас, і важать до одиниць кілограм, маса ж важких апаратів знаходиться у найвищій частині діапазону і складає кілька тонн. Наприклад, автор [11,12] наводить наступні межі діапазонів при класифікації за масою: <5кг; 5-30кг; 30-50кг; 500-5000кг; >5т відповідно [11].

Існує клас роботів, які здатні працювати на мілководді, переміщаючись по дну. До прикладу, такі роботи застосовуються у військовій сфері для пошуку мін, які були винесені течіями з моря на мілководдя [9]. Таким чином можна класифікувати підводних роботів за типом переміщення: у товщі води та донні, або ж комбіновані.

Можна виділити також інші способи класифікації підводних апаратів, які або частково перетинаються із розглянутими вище способами класифікації, або стосуються в більшій мірі неавтономних підводних апаратів, а не підводних роботів, тому обмежимося розглянутими способами класифікації.

1.3 Огляд сучасних наукових та комерційних розробок підводних роботів

Оскільки, підводні роботи мають дуже широку сферу застосування, то в даній галузі існує величезна кількість як наукових, так і комерційних проектів. Тому у цьому підрозділі розглянемо деякі з найкращих, найновіших чи найвідоміших підводних роботів.

1.3.1 Підводний робот Geneinno Titan 150M

Одним із найсучасніших підводних роботів розважального призначення є, спроектований у 2019р китайською фірмою Shenzhen Geneinno Technology Co.,LTD, підводний робот Geneinno Titan 150M.

Розглянемо його детальніше. Робот, укомплектований проводом довжиною 100м станом на жовтень 2019р коштує 2799\$, а проводом довжиною 150м – 2999\$ [13]. Маса робота складає 4.4кг, максимальна глибина занурення – 150м, максимальна швидкість 2м/с. Робот має 2 літій-іонні акумуляторні батареї, одна з яких знаходиться безпосередньо у роботі та живить його двигуни, а інша у буйі, який плаває на поверхні води та забезпечує бездротовий зв'язок з смартфоном оператора. Робот і буй з'єднані 100 (150) метровим проводом. Параметри акумуляторів наступні: 10.8V/9000mAh/97.2Wh та 10.8V/3200mAh/34.56Wh відповідно. Час автономної роботи системи робот-буй складає 4 години, час зарядження робота – 3 години [14].

Зовнішній вигляд підводного робота Geneinno Titan 150M наведено на рисунку 1.1. Даний робот здатний переміщувати невеликі предмети під водою за допомогою знімного маніпулятора, якого не видно на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд підводного робота Geneinno Titan 150M [13]

1.3.2 Підводний робот SoFi

SoFi (Soft robotic Fish) – наукова розробка лабораторії комп’ютерних наук та штучного інтелекту Массачусетського технологічного інституту (MITCSAIL), яка з 2018 року використовується для дослідження коралових рифів у Тихому океані.

Підводний робот SoFi являє собою повністю автономного гнучкого біонічного підводного рибу-робота, здатного виконувати підводну зйомку та науково-дослідні завдання. Риба має нейтральну плавучість, а її рух заснований виключно на біонічних принципах. Розміри даного робота складають 47x23x18 см, а маса – 1,6 кг. У ході експериментів, що проводились у тихому океані, досягнуто максимальної глибини занурення 18м, середня швидкість робота складала $21,7 \pm 3,2$ см/с, а час автономної активної роботи – 40хв від акумулятора ємністю 35Вт•год [7]. Середня швидкість занурення чи підйому складала $10,6 \pm 1,1$ см/с, а час перехідного процесу (10%) при зануренні на глибину 0,2м – $17,8 \pm 6,6$ с [7].

Зв’язок з операторським пультом встановлювався по гідроакустичному каналу зв’язку на відстані до 10м [7].

Зовнішній вигляд риби-робота наведено на рисунку 1.2.

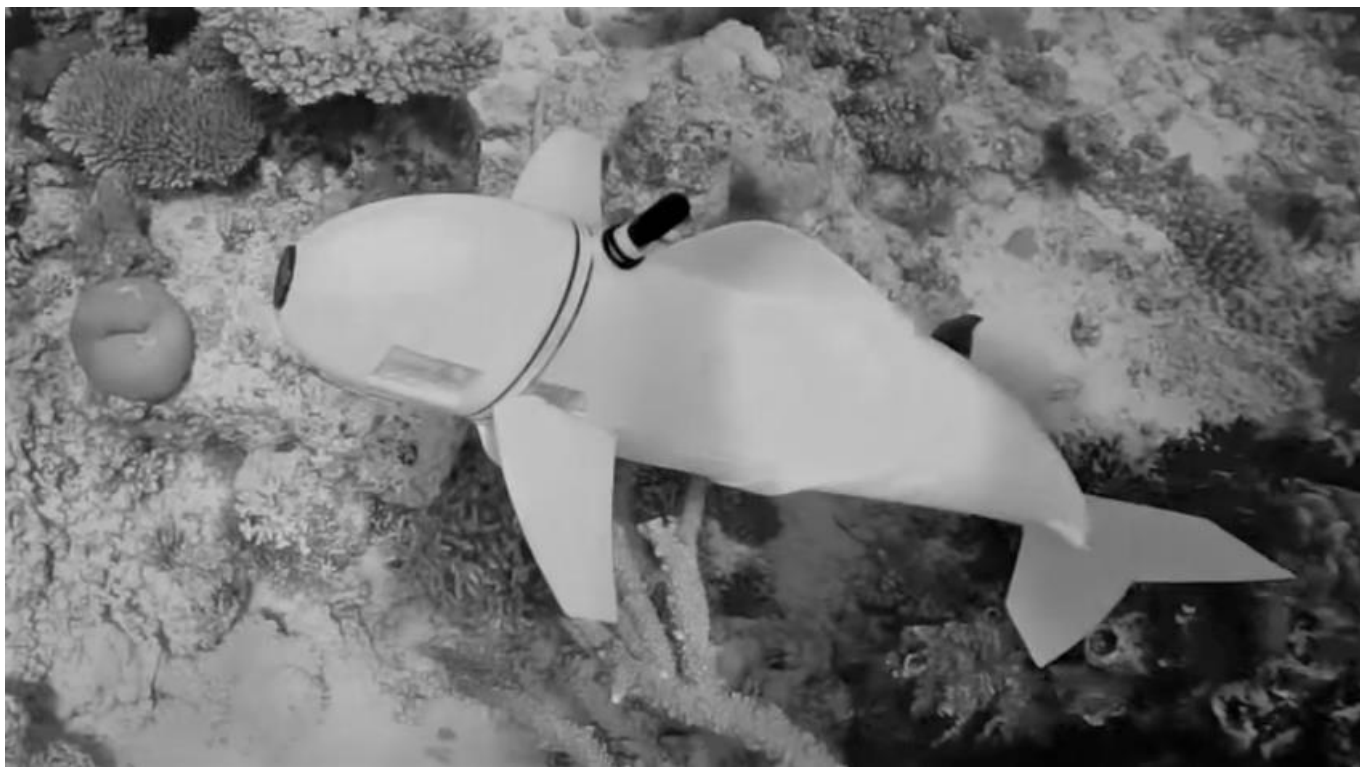


Рисунок 1.2 – Зовнішній вигляд біонічного підводного робота SoFi [15]

1.3.3 Підводний робот REMUS-100

REMUS-100 (Remote Environmental Monitoring Unit) був розроблений лабораторією океанографічних систем (OSL) Флоридського океанографічного університету Woods Hole. У промислових масштабах даний апарат виробляється компанією Hydroid Inc, яка повністю належить норвезькій компанії Kongsberg Maritime.

Підводний робот REMUS-100 є багатоцільовим апаратом та може застосовуватись у сфері океанографічних чи екологічних досліджень, досліджень підводних трубопроводів, робіт та досліджень під льодом, реагування на надзвичайні ситуації, а також у військовій сфері.

Розміри робота складають 19х170см, а маса 32кг; час автономної роботи 12 годин від вбудованих літій-іонних акумуляторів ємністю 1,5кВт•год. Дальність ходу робота від одного заряду акумулятора – 72км. Максимальна глибина занурення 100м [16].

Як зазначає виробник робота, система керування даного робота виконана на базі сучасних ARM-мікроконтролерів та ПЛІС [17].

Зображення зовнішнього вигляду підводного робота наведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд підводного робота REMUS-100 [18]

1.3.4 Порівняльний аналіз розглянутих сучасних підводних роботів

Серед величезної кількості сучасних підводних роботів останнім часом дуже широкого поширення набули легкі підводні роботи, зокрема мікророботи, застосування яких у наш час стає дуже перспективним майже в кожній галузі їх можливого застосування.

У даному розділі були розглянуті найсучасніші представники підводних роботів, які є найбільш типовими представниками своїх сфер застосування.

Основні технічні характеристики розглянутих сучасних підводних роботів зведено в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Характеристики деяких сучасних підводних роботів

Назва підводного робота	Призначення	Час автономної роботи, год	Максимальна глибина занурення, м	Маса, кг	Швидкість ходу, км/год
Geneinno Titan 150M	Розважальне	4	100	4,4	7,2
SoFi	Наукове	40	18	1,6	1
REMUS-100	Багатоцільовий: військове, наукове	12	100	32	9,4

1.4 Аналіз систем керування сучасних підводних роботів

На теперішній час найбільш використовуваними методами синтезу систем керування сучасними підводними роботами є методи та алгоритми нейронних мереж та методи адаптивних систем керування.

У магістерській дисертації для синтезу системи керування підводним роботом використовуються адаптивні методи та алгоритми.

Як відомо, адаптивні системи діляться на самоналагоджувальні, самоорганізовувальні та самоалгоритмізовувальні [22].

Під самоналагоджувальними розуміють такі адаптивні системи, у яких адаптація відбувається тільки за рахунок зміни параметрів регулятора. У самоорганізовувальних системах адаптація досягається завдяки зміні структури керуючого пристрою, а в самоалгоритмізовувальних – за рахунок зміни алгоритму керування[22].

У даній магістерській дисертації досліджуються самоналагоджувальні системи. У залежності від вимог вони поділяються на системи із стабілізацією якості та системи із оптимізацією якості. У першому випадку система забезпечує незмінний заданий рівень якості при зміні властивостей об'єкта керування і зовнішніх впливів, а в другому якість процесу керування чи адаптації повинна досягати екстремального значення при всіх можливих умовах роботи системи [22].

У свою чергу системи із стабілізацією якості діляться на системи із стабілізацією амплітудно-частотних характеристик, системи із стабілізацією імпульсних характеристик та адаптивні системи з моделлю [22].

Головною задачею синтезу адаптивних систем з моделлю є розрахунок контурів самоналагоджування [22,23,24].

У дисертації виконується синтез адаптивної системи з моделлю, загальна структурна схема якої представлена на рисунку 1.4.

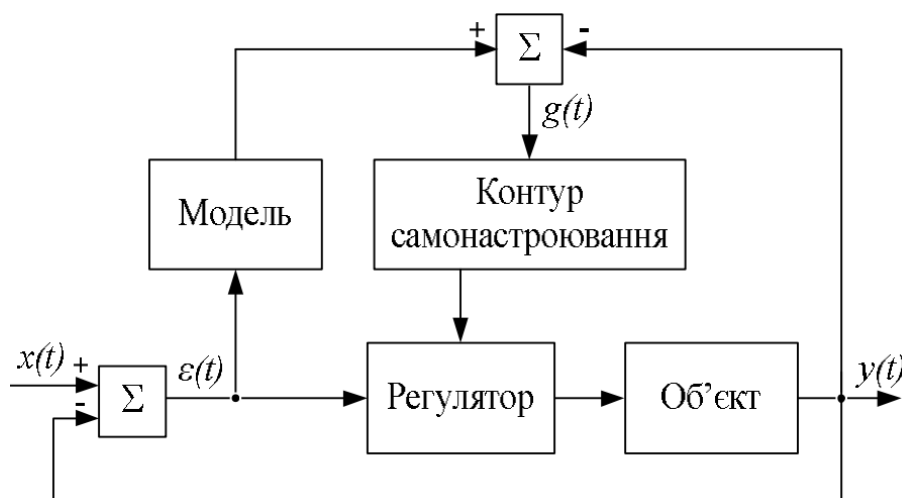


Рисунок 1.4 – Структурна схема адаптивної системи з моделлю [22]

Висновки до розділу 1

Як показує огляд предметної області, існує безліч способів та сфер застосування підводних роботів.

Однак, аналіз останніх публікацій показує наявність 3 основних проблем, які виникають при синтезі систем керування сучасними підводними роботами.

По-перше неможливість віддаленого керування роботом по бездротовому каналу зв'язку, оскільки радіохвилі у воді дуже швидко загасають, а гідроакустичний канал є найбільш непередбачуваним каналом зв'язку щодо виникнення завад. Також гідроакустичні канали не можуть забезпечити високу швидкість передачі даних, що унеможлиблює його використання у сучасних підводних мікророботах, які можуть вести підводну зйомку. Тому єдиним способом вирішення цієї проблеми є використання буїв на поверхні води, які з'єднані з підводним роботом дротових каналів зв'язку. Або ж потрібно проектувати повністю автономні підводні роботи.

По-друге, актуальною залишається проблема підвищення часу автономної роботи підводних роботів, що особливо важливо при вирішенні першої проблеми шляхом проектування повністю автономних роботів.

По-третє, умови експлуатації підводних роботів дуже складні та непередбачувані, а процес взаємодії підводного робота з оточуючою його водою теж досить складний та вимагає спрощень і лінеаризації при побудові його математичної моделі, що негативно позначається на якості процесів керування у синтезованих з використанням такої моделі системі керування. Ще більше ускладнює процес керування підводним роботом постійна зміна його коефіцієнта підсилення за рахунок приєднаної маси води та вантажу, піднятого маніпулятором, та зміна постійної часу за рахунок приєданого моменту інерції рідини, яка оточує робота.

Остання проблема повністю не вирішена. Особливо у тих випадках, коли необхідно забезпечити високу якість керування рухом підводного робота при його низькій вартості.

Таким чином, огляд предметної області дозволяє зробити висновок про необхідність розроблення ефективних методів та алгоритмів керування підводними роботами.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ СИСТМИ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ РОБОТОМ

Структура проектного робота визначається перш за все його призначенням, сферою застосування та виконуваними ним функціями.

Даний робот може застосовуватись у оглядово-пошуковій, науковій та розважальній сфері. Він здатний виконувати високоякісну підводну відео і фотозйомку та переміщувати предмети у воді. Крім цього значною перевагою даного робота є можливість застосування його у сфері екологічних досліджень для моніторингу екологічного стану водойм. Робот може вимірювати основні фізико-хімічні показники води: температуру, електропровідність, прозорість, концентрацію розчинених солей та рН, що дозволяє зробити висновок про екологічний стан водойми. Крім фотозйомки, робот може робити і гідроакустичні знімки, що дозволяє використовувати його для пошуку і дослідження затонулих та інших підводних об'єктів, картографування рельєфу дна, створення батиметричних карт, а також виявлення та знешкодження затонулих мін, шляхом скидання на них спеціального дистанційно керованого підривного заряду. Цей робот призначений насамперед для застосування у річках, озерах, річкових чи морських портах, а також у прибережній зоні морів.

Предбачається експлуатація проектного підводного робота у кількох режимах: автономному та телекерованому. У дистанційно керованому режимі передбачається 2 варіанти зв'язку підводного робота із пультом оператора: у першому випадку робот приєднується дротом довжиною до 100м безпосередньо до пульту оператора, а в другому випадку цим же дротом робот приєднується до плавучого буя, який «спілкується» із пристроєм оператора по радіоканалу.

Канал зв'язку між роботом та буєм повинен підтримувати високошвидкісну передачу даних для передачі відзнятого відеоматеріалу. Це вимагає у якості лінії зв'язку використовувати або оптоволоконний кабель, або мідну виту пару. Оптичний кабель легкий, тонкий та не поступається міцністю мідному дроту, або

навіть перевищує його. Застосування оптичного кабелю дозволить зменшити масу системи робот-буй та зменшити сили опору при русі робота. З іншого боку мідний кабель дозволяє забезпечити живлення робота від буя чи пристрою оператора. Що у свою чергу дозволяє здійснювати живлення робота від акумуляторів та сонячних елементів, встановлених на буйі, а в роботі встановити акумулятор меншої ємності, зменшивши його масу. Таким чином досягається підвищення автономності робота завдяки зменшенню його маси шляхом перенесення частини акумуляторів у буй, а також завдяки наявності додаткових сонячних елементів живлення у буйі. Тому було прийнято рішення використовувати мідний дріт довжиною до 100м.

Також передбачається можливість використання багатьох роботів у складі єдиної IoT-системи у випадку застосування даних роботів для ефективного моніторингу забрудненості вод та виявлення джерел їх забруднення, що дозволить уникнути виникнення негативних екологічних наслідків. Структурна схема системи роботів у складі IoT-системи наведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурна схема IoT системи моніторингу екологічного стану вод на базі підводних роботів

Корпус робота виконаний із високоміцного пластику, здатного витримувати тиск води 1МПа при зануренні на глибину 100м. Робот виконаний таким чином, що в цілому він має майже нейтральну плавучість, тобто середня густина робота приблизно дорівнює густині води, або трохи менша за неї, так щоб робот із вимкненими двигунами залишався на поверхні води.

На корпусі робота передбачений гідроізований роз'єм для підключення дроту, інший кінець якого підключається таким же роз'ємом або до буя, або до пульта оператора. Буй, що плаватиме на поверхні води, містить сонячні елементи живлення та додатковий акумулятор для підвищення автономності робота. Також буй містить Wi-Fi модуль для бездротового зв'язку з пристроєм оператора та передачі оператору відзнятого відеоматеріалу у реальному часі, коли робот працює у режимі підводної зйомки. В останньому випадку у якості пульта оператора може виступати його смартфон.

Структурна схема підводного робота з пристроєм оператора у випадку його роботи у дистанційно керованому режимі наведена на рисунку 2.2.

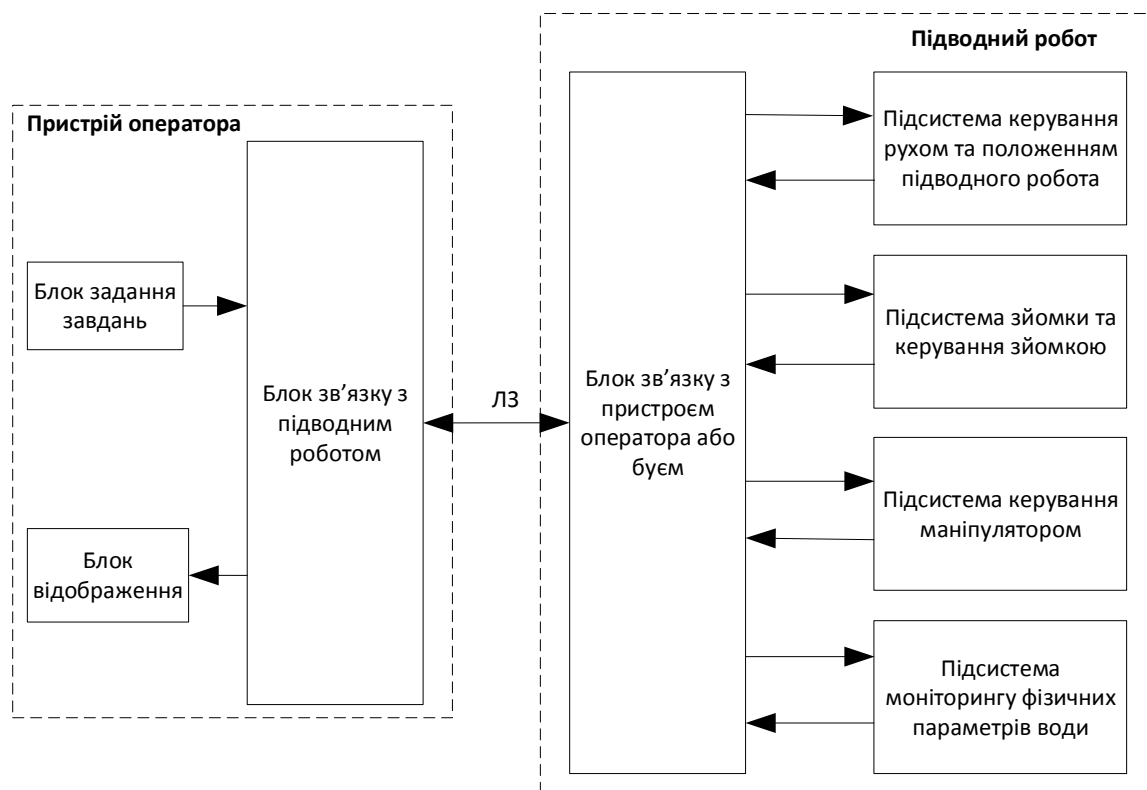


Рисунок 2.2 – Структурна схема підводного робота з пристроєм оператора

Пристрій оператора виконаний у водонепроникному корпусі (клас пило-волого захисту IP68). На задньому боці корпусу розміщений роз'єм для підключення робота. Передня ж панель являє собою сенсорний дисплей, що виконує функцію пристрою відображення та частково блока задання завдань. Блок задання завдань складають сенсорна панель дисплея та MEMS-датчик всередині корпусу пристрою. Так що робот повторюватиме рухи оператора. Також пристрій оператора містить акумулятор для живлення самого пристрою та робота.

Структурну схему підводного робота із буєм, у випадку його роботи у режимі моніторингу екологічного стану вод, наведено на рисунку 2.3.

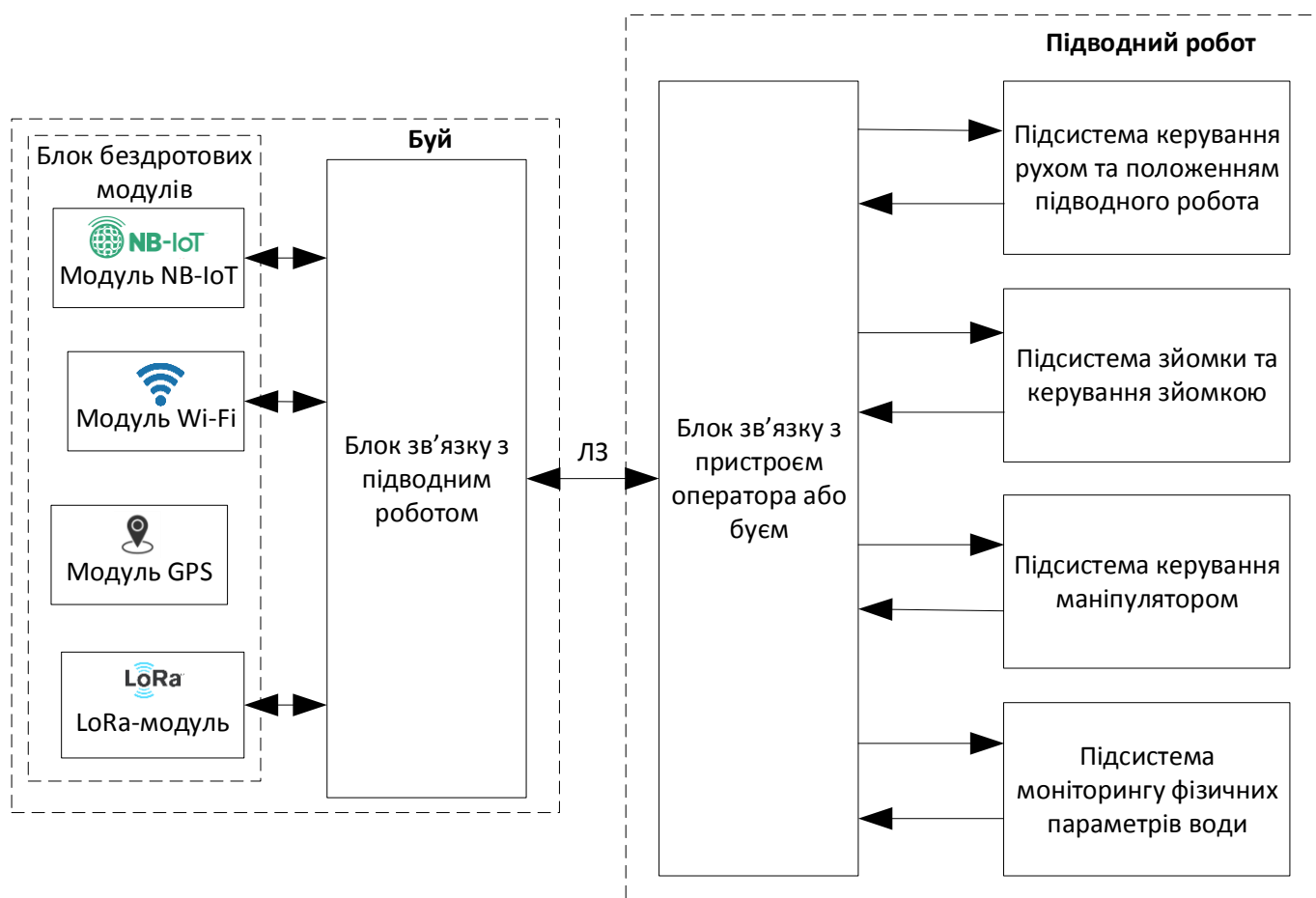


Рисунок 2.3 – Структурна схема підводного робота із буєм

Буй являє собою плавучий пристрій, який плаватиме на поверхні води. На нижній частині буя розміщено роз'єм для підключення робота, а на верхній – сонячні елементи живлення. Всередині корпусу розміщено акумулятор ємністю

100 А · год для живлення самого буя та робота в нічний час та за відсутності яскравого сонячного світла. Буй містить блок бездротових модулів, до складу якого входять Wi-Fi, GPS, LoRa та NB-IoT модулі. Для передачі даних моніторингу та розташування з GPS-модуля у випадку роботи робота у складі IoT-системи, у режимі моніторингу забрудненості води призначені LoRa та NB-IoT модулі. Модуль Wi-Fi використовується для зв'язку із смартфоном оператора, коли робот працює у дистанційно керованому режимі.

Для приведення робота у рух використовуються 6 двигунів постійного струму: 2 маршові двигуни, що забезпечують прямолінійний рух робота, 2 двигуни вертикального ходу, які керують глибиною занурення, та 2 додаткові двигуни горизонтального ходу. Двигуни вертикального ходу використовуються також і для керування тангажем робота, а 2 додаткові двигуни горизонтального ходу використовуються для керування курсом.

Живлення робота забезпечується або від вбудованого акумулятора ємністю 20 А · год, або пульта оператора чи сонячних елементів та акумулятора буя. Обидва акумулятори за сонячної погоди можуть підзаряджатися від сонячних елементів.

Також робот має знімний маніпулятор, що дозволяє захоплювати та переміщувати невеликі (до 5кг) предмети під водою. Маніпулятор може використовуватись у дистанційно керованому режимі для захоплення та підняття на поверхню виявлених затонулих предметів або для виконання оператором інших операцій під водою.

Проектований підводний робот складається з блока зв'язку з пристроєм оператора або буєм та 4 основних підсистем: підсистеми керування рухом та положенням робота, підсистеми зйомки та керування зйомкою, підсистеми керування маніпулятором та підсистеми моніторингу фізичних параметрів води (підсистеми вимірювань).

Блок зв'язку з пристроєм оператора або буєм забезпечує передачу даних із камери та датчиків робота до пристрою оператора чи буя, а також прийом команд керування від пристрою оператора.

Висновки до розділу 2

Таким чином, розроблена структурна схема дозволяє керувати підводним роботом у автономному та телекерованому режимах з виконанням функцій переміщення, моніторингу екологічного стану води, фото та відео зйомки, обстеження рельєфу дна.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ РОБОТОМ

На базі структурної схеми системи керування підводним роботом розроблена функціональна схема, яка представлена у графічних матеріалах.

Функціональна схема складається з декількох основних підсистем.

3.1 Структура та функціонування підсистеми керування рухом та положенням підводного робота

Підсистема керування рухом та положенням робота складається із силового блока, блока датчиків положення, а також блока регуляторів. Силовий блок складається із блока виконавчих двигунів та блока підсилювачів потужності, що містить 6 ідентичних підсилювачів потужності для кожного двигуна. До складу блока виконавчих двигунів входять: 2 маршових двигуни, які розміщені у задній частині корпусу робота; 2 двигуни вертикального ходу, призначені для керування глибиною занурення та тангажем робота; і 2 двигуни горизонтального ходу, призначені для керування ристанням та збільшення маневреності робота у горизонтальній площині. Блок регуляторів містить 6 аналогових адаптивних регуляторів, необхідних для високоякісного керування кожним двигуном, а тому і всім роботом. Блок датчиків положення містить мікросхему MEMS-сенсора, I²C датчик тиску, ультразвуковий I²C датчик відстані до дна, I²C датчик маршової швидкості, а також модуль гідролокатора. Мікросхема MEMS містить у своєму складі трьохосьові гіроскоп, акселерометр та компас, а також окремий аналого-цифровий перетворювач для кожного каналу вимірювання, мультиплексор та контролер I²C шини. Таким чином, ця мікросхема являє собою цифровий гіроскоп, акселерометр, компас та видає на I²C шину двійковий код значення крену, тангажу, ристання, а також проекції прискорення робота на кожную із його трьох осей. I²C датчик тиску являє собою тензодатчик суміщений в одному корпусі із АЦП та

контролером I²C шини. Оскільки, тиск стовпа рідини (води) лінійно залежить від глибини занурення, то даний датчик відображає глибину занурення робота та видає цифровий код величини, пропорційної її значенню, на I²C шину. Інші I²C датчики влаштовані аналогічним чином та видають на I²C шину двійкові коди відповідних величин, зокрема датчик маршової швидкості вимірює швидкість потоку води, що проходить вздовж головної осі робота, яка, очевидно, залежить від маршової (вздовж головної горизонтальної осі робота) швидкості робота. Модуль гідролокатора містить випромінювач, який може випромінювати УЗ хвилі у різних напрямках, та приймач ультразвуку, АЦП та I²C контролер та видає на шину оцифрований сигнал луни. Таким чином, отримавши луну із різних напрямків, можна скласти гідроакустичний знімок. Отже, підсистема керування рухом та положенням забезпечує високоякісне керування швидкістю руху, глибиною занурення, тангажем та рисканням робота.

Технічне рішення використовувати аналогові адаптивні регулятори, дозволило здешевити систему за рахунок використання в системі всього одного відносно дешевого мікроконтролера, на який у цьому випадку не покладається швидке відпрацювання складних алгоритмів керування. Використання ж цифрових датчиків у такій системі пояснюється значним їх здешевленням та поширеністю в наш час, а також простотою їх використання у мікроконтролерних системах.

3.2 Структура та функціонування підсистеми зйомки та керування зйомкою

Підсистема зйомки та керування зйомкою містить камеру та світлодіодний блок підсвічування, які виводяться на передню панель робота. Крім цього, дана підсистема містить стабілізатор камери, що дозволяє забезпечити високоякісну і плавну відео зйомку навіть у момент занурення робота. Камера жорстко закріплена на гіростабілізованій платформі, яка може вільно обертатися навколо усіх трьох осей. На платформу встановлено мікросхему MEMS-сенсора, яка виконує функцію цифрового трьохосьового гіроскопа, який фіксує величини крену, тангажа та

рискання платформи з камерою. Для компенсації відхилень камери під дією збурень передбачений блок двигунів стабілізації камери, до складу якого входять 3 мікродвигуни постійного струму. Мікродвигун повороту в горизонтальній площині компенсує рискання камери, мікродвигун повороту у вертикальній площині – тангаж, а мікродвигун повороту камери навколо головної оптичної осі – крен. Для керування мікродвигунами стабілізації призначений блок регуляторів, що містить 3 ідентичні аналогові регулятори, сигнали керування з яких подаються через блок підсилювачів потужності на мікродвигуни стабілізації.

3.3 Структура та функціонування підсистеми вимірювань

Підсистема моніторингу фізичних параметрів води (підсистема вимірювань) призначена для вимірювання основних фізико-хімічних параметрів води у режимі екологічного моніторингу. Вона містить I²C датчик температури, датчик прозорості води, TDS-датчик та рН-метр, а також аналоговий мультиплексор, АЦП та контролер I²C. TDS-датчик призначений для оцінки рівня мінералізації води (total dissolved solids), тобто вимірювання концентрації розчинених у воді солей шляхом вимірювання її електропровідності. рН-метр вимірює значення водневого показника, що дозволяє оцінити ступінь кислотності чи лужності водного розчину, що оточує робота. Датчик температури дозволяє визначити рівень теплового забруднення водойми. Показання цього датчика використовуються ще і для температурної компенсації при розрахунку концентрації розчинених у воді солей на основі показань TDS-датчика. У цілому ж дана підсистема видає оцифровані дані з усіх датчиків вимірювання параметрів води на I²C шину.

3.4 Структура та функціонування підсистеми керування маніпулятором

Підсистема керування маніпулятором, крім самого маніпулятора, який призначений для захоплення та переміщення під водою невеликих предметів,

містить 2 крокові двигуни та драйвер крокового двигуна, який виконаний у вигляді єдиної мікросхеми. Використана мікросхема драйвера здатна керувати одночасно двома кроковими двигунами. У своєму складі вона містить 2 підсилювачі потужності та цифровий регулятор. Один з крокових двигунів призначений для керування затисканням захопленого предмета, а інший для повороту маніпулятора з предметом навколо головної горизонтальної осі робота.

3.5 Функціонування підсистеми мікроконтролера та робота в цілому

Сигнали з датчиків через I²C шину подаються на мікроконтролер (МК), який у свою чергу, видає на неї адресні сигнали опитування давачів. Сигнали з датчиків підсистеми керування рухом та положенням порівнюються із відповідними сигналами завдань, що приходять або з пристрою оператора чи буя у телекерованому режимі, або генеруються програмою мікроконтролера у автономному режимі.

Утворені в мікрокнтролері сигнали помилки через цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) подаються на аналоговий демультіплексор, з виходу якого – на входи відповідних адаптивних регуляторів. Утворені адаптивними регуляторами сигнали керування через підсилювачі потужності надходять на відповідні виконавчі двигуни.

Мікроконтролер також керує роботою камери та системи підсвічування при зйомці.

По команді мікроконтролера відбувається запис чи передача зображення з камери. Те ж саме стосується і запису чи передачі сигналів з давачів підсистеми вимірювань, а також давачів інших підсистем.

Конструктивно електронна частина робота виконана на кількох друкованих платах. Мікроконтролер та блоки регуляторів підсистем керування рухом та зйомки розташовані основній друкованій платі робота. Електронні компоненти силових блоків розташовані на малих друкованих платах безпосередньо біля відповідних

силових виконавчих пристроїв механічної частини робота. Також є ще кілька малих друкованих плат з іншими електронними компонентами робота.

Висновки до розділу 3

Розроблення структурної та функціональної схем, вибір основних компонентів підводного робота проводились таким чином, щоб забезпечити максимальну функціональність, надійність та якість підводного робота при його мінімальній вартості.

4 РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДВОДНОГО РОБОТА

Як відомо, динаміка рухового комплексу підводного робота чинить великий вплив на динаміку робота в цілому. Тому для синтезу високоякісної системи керування необхідно детально розглянути динаміку рухового комплексу підводного робота, а саме динаміку його двигунів, динаміку взаємодії гвинта робота з навколишньою водою, вплив сили тяги рухового комплексу на динаміку всього робота, та синтезувати систему керування на базі отриманої математичної моделі.

4.1 Математична модель взаємодії гвинта підводного робота з водою

Детальний опис взаємодії гвинта підводного робота із оточуючою водою наведено в [19]. Після виключення з моделі деяких складових підіймального упору та моменту гвинта, що чинять нехтовно малий вплив на динаміку робота у режимі маневрування, подальших математичних перетворень та спрощень, що зберігають адекватність та точність моделі, автор [19] отримує наступну математичну модель динаміки взаємодії гвинта підводного робота з навколишньою водою:

$$F_{\text{дв}} = K_F \cdot |\omega| \cdot s_{\tau}(\omega, v_p); \quad (4.1)$$

$$M_{\text{дв}} = K_M \cdot |\omega| \cdot (s_{\tau}(\omega, v_p) + H_{\text{гд}} \cdot K_r \cdot \omega); \quad (4.2)$$

$$s_{\tau}(\omega, v_p) = (K_s + H_{\text{гд}}) \cdot \omega - \frac{v_p}{2} - \text{sign}(\omega) \cdot \sqrt{\left(K_s \cdot \omega - \frac{v_p}{2}\right)^2 + 2 \cdot H_{\text{гд}} \cdot K_s \cdot \omega^2}; \quad (4.3)$$

$$K_s = \frac{K_F}{4 \cdot \rho \cdot S_{\text{гв}}}; \quad (4.4)$$

$$H_{\text{Гд}} = H + \delta \cdot \text{sign}(\omega) \quad (4.5)$$

$$v_p = \begin{cases} v, & \text{якщо } \text{sign}(\omega) = \text{sign}(v), \\ 0, & \text{якщо } \text{sign}(\omega) \neq \text{sign}(v); \end{cases} \quad (4.6)$$

де,

$F_{\text{дв}}$ – сила тяги двигуна підводного робота;

K_F – коефіцієнт сили тяги;

$M_{\text{дв}}$ – момент на валу двигуна;

K_M – коефіцієнт моменту;

$s_{\tau}(\omega, v_p)$ – абсолютне ковзання гвинта робота;

$H_{\text{Гд}}$ – гідродинамічний крок гвинта;

H – крок гвинта підводного робота;

δ – поправка на крок гвинта у воді;

$S_{\text{Гв}}$ – площа диска гвинта;

v – швидкість течії зовнішнього середовища;

K_r – коефіцієнт профільних втрат гвинта.

Однак, як видно з наведеної вище математичної моделі взаємодії гвинта робота з оточуючою водою, вона все одно досить складна та не лінійна, що не дозволяє використати її для отримання передавальної функції даної ланки, яку було б зручно використовувати при синтезі системи керування.

Це вимагає подальших досліджень для можливості подальшого спрощення математичної моделі з деякою втратою її точності. Також потрібні дослідження можливості компенсації впливу цієї втрати точності на якість процесів керування за рахунок адаптивності використовуваної системи керування.

Крім того, коефіцієнт моменту K_M та момент інерції двигуна J_d під час експлуатації робота постійно змінюються за рахунок приєднаної маси та моменту

інерції навколишньої води [19]. Типові межі коридору можливої зміни значень цих параметрів складають близько $\pm 20\%$ від їх номінальних значень [19]:

$$K_{M \min} \leq K_{M \text{ н}} \leq K_{M \max}; \quad (4.7)$$

$$J_{D \min} \leq J_{D \text{ н}} \leq J_{D \max}. \quad (4.8)$$

Підставимо в отриману математичну модель чисельні значення параметрів проектного робота, а також деякі значення параметрів взаємодії робота з навколишнім середовищем, типові для роботів даного класу, які наведені в [19].

Таким чином, будемо використовувати наступні чисельні значення параметрів у формулах (4.1) – (4.6) математичної моделі: $S_{\text{ГВ}} = 0,01 \text{ м}^2$; $K_F = 4 \text{ Н} \cdot \text{с}^2 / \text{м}$; $H = 0,12 \text{ м}$; $\delta = 0,002 \text{ м}$; $K_r = 0,12$; K_M : $K_{M \min} = 0,065 \text{ Н} \cdot \text{с}^2$; $K_{M \max} = 0,085 \text{ Н} \cdot \text{с}^2$; $K_{M \text{ н}} = 0,075 \text{ Н} \cdot \text{с}^2$.

4.2 Дослідження функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання валу двигуна

Як зазначалось вище, нелінійність отриманої математичної моделі не дозволяє використати її для отримання передавальної функції даної ланки системи. Тому необхідно виконати дослідження функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання валу двигуна для можливості її спрощення з деякою втратою точності математичної моделі, а також дослідити можливості компенсації впливу цієї втрати точності на якість процесів керування за рахунок адаптивності використовуваної системи керування.

4.2.1 Квадратична апроксимація функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання валу двигуна

Як видно з отриманої вище математичної моделі взаємодії гвинта робота з оточуючою водою (4.1-4.6), вона досить складна та не лінійна, що не дозволяє використовувати її для синтезу системи керування.

Після проведених досліджень виявилось, що залежність сили тяги, яку розвиває гвинт робота, від кутової швидкості обертання валу двигуна добре апроксимується параболою.

Тому,

$$F_{\text{дв}} = K_F \cdot |\omega| \cdot s_t(\omega, v_p) \approx K_F \cdot \omega^2 \cdot K_{\Delta} \cdot \text{sign}(\omega), \quad (4.9)$$

де,

$K_{\Delta} = K_{\Delta}(\omega)$ – змінний коефіцієнт відношення значення функції $F_{\text{дв}}(\omega)$ до значення квадратичної функції, якою апроксимовано дану функцію.

Однак, отримана залежність (4.9) все одно нелінійна і не придатна для отримання передавальної функції та синтезу системи керування. Тому необхідно лінеаризувати дану нелінійну функцію, а вплив на якість процесів керування похибок, які виникнуть при цьому, компенсувати адаптивністю синтезованої системи керування.

У дисертації за проведеним дослідженням було обрано $K_{\Delta} = \frac{1}{28,82}$, що спрощує отримання передавальних функцій.

4.2.2 Лінеаризація функції залежності сили тяги від кутової швидкості обертання валу двигуна

З формули (4.9) залежності сили тяги, яку розвиває гвинт робота від кутової швидкості обертання валу двигуна вираз $\omega^2 \cdot \text{sign}(\omega)$ замінюємо на ω .

Остаточна, після проведеної лінеаризації отримано наступну формулу для сили тяги гвинта робота:

$$F_{\text{дв}} = K_F \cdot \omega \cdot K_{\Delta} \quad (4.10)$$

Враховуючи формулу (4.10) передавальна функція гвинта робота з тяговим зусиллям має вигляд:

$$W_2(s) = K_F \cdot K_{\Delta} \quad (4.11)$$

4.3 Математична модель маршових двигунів підводного робота

4.3.1 Вибір маршових двигунів підводного робота

Вибір маршових двигунів підводного робота виконувався за (4.2-4.3) відносно потужності, яка необхідна для функціонування та визначенням номінальних моментів.

Був обраний конкретний тип маршових двигунів Crouzet DC Motor (Part number 82740402), який характеризується наступними технічними параметрами: $U_{\text{ном}} = 24\text{В}$, $I_{\text{ном}} = 1,1\text{А}$, $P = 30\text{Вт}$, $M_{\text{ном}} = 40 \cdot 10^{-3}\text{Н} \cdot \text{м}$ [21].

4.3.2 Математична модель двигуна постійного струму

Для отримання передавальної функції першої ланки системи рушійного комплексу – маршового двигуна підводного робота $W_{\text{дв}}(s)$ запишемо систему рівнянь, які описують динаміку двигуна постійного струму.

Як відомо система рівнянь динаміки двигуна постійного струму має наступний вигляд [19,20]:

$$\begin{cases} L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + C_e \omega = U \\ C_m i_{\text{я}} - J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{нав}} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + R_{\text{я}} i_{\text{я}} + C_e \omega = U \\ i_{\text{я}} = \frac{1}{C_m} \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{нав}} \right) \end{cases}, \quad (4.12)$$

$$C_e = \frac{U_{\text{ном}}}{\omega_0}, C_m = \frac{M_{\text{ном}}}{I_{\text{я ном}}}, \text{де} \quad (4.13)$$

де

$L_{\text{я}}$ — індуктивність обмотки якоря маршового двигуна підводного робота;

$R_{\text{я}}$ — опір обмотки якоря;

$i_{\text{я}}$ — струм якоря маршового двигуна підводного робота;

$U_{\text{ном}}$ — номінальна напруга маршового двигуна підводного робота;

$I_{\text{я ном}}$ — номінальний струм якоря;

ω_0 — кутова швидкість ідеального холостого ходу маршового двигуна підводного робота;

J - момент інерції ротора маршового двигуна підводного робота.

Після підстановки другого рівняння системи у перше отримаємо наступне диференціальне рівняння динаміки маршового двигуна підводного робота:

$$\frac{L_{\text{я}}}{C_m} \cdot J \frac{d^2 \omega}{dt^2} + \frac{R_{\text{я}}}{C_m} \cdot \left(J \frac{d\omega}{dt} + M_{\text{нав}} \right) + C_e \omega = U \quad (4.14)$$

Далі вважаючи входом системи напругу $X(t) = U(t)$, яка подається на двигун, а виходом — кутову швидкість обертання якоря двигуна $Y(t) = \omega(t)$. Після підстановки $X(t) = U(t)$ та $Y(t) = \omega(t)$ у рівняння динаміки маршових двигунів підводного робота та виконання перетворення Лапласа лівої та правої частини отриманого диференціального рівняння на основі теореми про диференціювання оригіналу, отримаємо зручне для запису передавальної функції звичайне алгебраїчне рівняння відносно зображень вхідних та вихідних сигналів ланки:

$$\frac{L_{\text{я}} J}{C_m} \cdot s^2 Y(s) + \frac{R_{\text{я}} J}{C_m} \cdot s Y(s) + C_e = X(s) \quad (4.15)$$

Наступним кроком знайдемо передавальну функцію маршового двигуна підводного робота за кутовою швидкістю [19,20]:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}} \cdot s^2 + \frac{R_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}} \cdot s + C_e} = \frac{K_{\text{дв}}}{T_e \cdot T_{\text{м}} \cdot s^2 + T_{\text{м}} \cdot s + 1}, \quad (4.16)$$

де

$T_e = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}$ – електромагнітна постійна часу маршового двигуна підводного робота;

$T_{\text{м}} = \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_{\text{м}}}$ – електромеханічна постійна часу маршового двигуна підводного робота;

$K_{\text{дв}} = \frac{1}{C_e} = \frac{1}{\frac{U_{\text{ном}}}{\omega_0}} = \frac{\omega_0}{U_{\text{ном}}}$ – коефіцієнт підсилення маршового двигуна підводного робота.

Беручи до уваги факт того, що $T_e \cdot T_{\text{м}} \leq T_{\text{м}}$, тобто коефіцієнт при s^2 нехтовно малий, можна знехтувати доданком $T_e \cdot T_{\text{м}} \cdot s^2$ у (4.16). Тому остаточно маємо наступну передавальну функцію маршового двигуна підводного робота:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{K_{\text{дв}}}{T_e \cdot T_{\text{м}} \cdot s^2 + T_{\text{м}} \cdot s + 1} \approx \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{м}} \cdot s + 1} \quad (4.17)$$

Підставивши чисельні значення параметрів обраного двигуна: $\omega_0 = 5800 \frac{\text{об}}{\text{хв}} = 607,0667 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $\omega_{\text{ном}} = 4800 \frac{\text{об}}{\text{хв}} = 502,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $U_{\text{ном}} = 24\text{В}$, $P_{\text{ном}} = 20\text{Вт}$, $P = 30\text{Вт}$, $R_{\text{я}} = 4,2\text{Ом}$, $J = 45 \cdot 10^{-7} \text{кг} \cdot \text{м}^2$, $I_{\text{ном}} = 1,1\text{А}$, $L = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{Гн}$, $M_{\text{ном}} = 40 \cdot 10^{-3} \text{Н} \cdot \text{м}$, $T_{\text{м}} = 0,0131\text{с}$ [21] у передавальну функцію (4.17). Момент інерції ротора двигуна з редуктором разом із приєднаним моментом інерції води може змінюватись у межах $J_{\text{д min}} \leq J_{\text{д н}} \leq J_{\text{д max}}$, де $J_{\text{д min}} = 0,003 \text{кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{\text{д н}} = 0,005 \text{кг} \cdot \text{м}^2$, $J_{\text{д max}} = 0,007 \text{кг} \cdot \text{м}^2$. Очевидно, що наявність редуктора та (або) приєданого моменту інерції рідини

змінять паспортну електромеханічну постійну часу двигуна. Тому у цьому випадку її потрібно перерахувати за наступною формулою:

$$T_{\text{м на в}} = \frac{R_{\text{я}} \cdot J_{\text{д н}}}{C_e C_{\text{м}}} = \frac{T_{\text{м}}}{J} \cdot J_{\text{д н}} = 14,6207 \text{ с}. \quad (4.18)$$

Також обчисливши $K_{\text{д в}} = \frac{\omega_0}{U_{\text{ном}}} = \frac{607,0667}{24} = 25,2944$ та підставивши результат у (4.17) отримаємо передавальну функцію маршового двигуна підводного робота:

$$W_{\text{д в}}(s) = \frac{25,2944}{14,6207 \cdot s^2 + s}. \quad (4.19)$$

4.4 Зв'язок сили тяги маршових двигунів із швидкістю руху підводного робота

Зв'язок сили тяги маршових двигунів із швидкістю руху підводного робота очевидний із другого закону Ньютона. Сила тяги двигунів надає підводному роботу прискорення. Сили опору руху робота на даному етапі не враховуємо, вони будуть враховані як зовнішні збурення при моделюванні реального підводного робота.

Таким чином, записавши рівняння другого закону Ньютона у диференціальній формі та виконавши перетворення Лапласа його лівої і правої частини отримаємо передавальну функцію «сила тяги маршових двигунів – швидкість руху підводного робота» $W_{Fv}(s)$:

$$F_{\text{д в}} = m \frac{dv}{dt}, \quad (4.20)$$

$$W_{Fv}(s) = \frac{1/m}{s}, \quad (4.21)$$

де m – маса підводного робота із урахуванням маси піднятого маніпулятором вантажу та приєднаної маси води.

4.5 Отримання передавальної функції підводного робота за швидкістю руху

Для отримання передавальної функції підводного робота за швидкістю руху розглянемо структурну схему контура керування швидкістю робота.

Структурна схема контура керування швидкістю підводного робота наведена на рисунку 4.1.

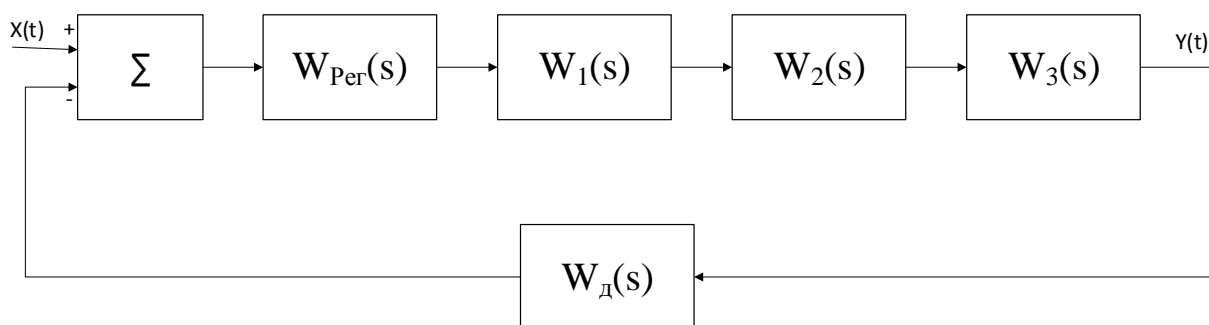


Рисунок 4.1 – Структурна схема контура керування

Розглянутий контур керування складається із наступних структурних блоків:

- $W_{\text{per}}(s)$ – передавальна функція регулятора;
- $W_1(s) = W_{\text{дв}}(s)$ – передавальна функція маршового двигуна підводного робота за кутовою швидкістю;
- $W_2(s) = W_{\text{wF}}(s)$ – передавальна функція гвинта за тяговим зусиллям;
- $W_3(s) = W_{\text{Fv}}(s)$ – передавальна функція «Сила тяги – швидкість»;
- $W_{\text{д}}(s) = 1$ – передавальна функція датчика швидкості руху робота.

Для отримання загальної передавальної функції всієї системи розглянуту структурну схему (Рисунок 4.1) необхідно спростити відповідно до правил перетворення структурних схем до вигляду зображеного на рисунку 4.2.

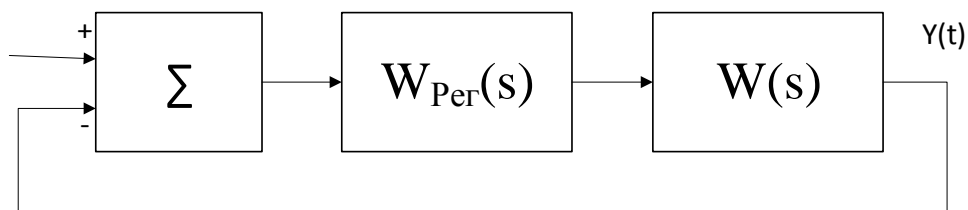


Рисунок 4.2 – Спрощена структурна схема контура керування

Таким чином передавальна функція підводного робота за швидкістю запишеться наступним чином:

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) = W_{дв}(s) \cdot W_{wF}(s) \cdot W_{Fv}(s). \quad (4.22)$$

Як бачимо, передавальні функції всіх ланок системи рушійного комплексу підводного робота були отримані вище, зокрема передавальна функція першої ланки – маршового двигуна за кутовою швидкістю $W_1(s) = W_{дв}(s)$, передавальна функція другої ланки – гвинта за тяговим зусиллям $W_2(s) = W_{wF}(s)$ та останньої третьої ланки – передавальна функція «сила тяги – швидкість» $W_3(s) = W_{Fv}(s)$. Це дозволяє перейти до конкретного значення $W(s)$, що дозволить використати її для синтезу адаптивної системи керування підводним роботом.

Остаточно, після підстановки всіх чисельних значень параметрів усіх компонентів системи, які наведені у попередніх підрозділах, у відповідні передавальні функції на основі формули (4.22) отримаємо передавальну функцію підводного робота за швидкістю руху:

$$W(s) = W_1(s) \cdot W_2(s) \cdot W_3(s) = \frac{0,7021}{14,6207 \cdot s^2 + s}. \quad (4.23)$$

Висновки до розділу 4

Таким чином, використовуючи математичний опис динаміки рушійного комплексу підводного робота, було отримано загальну математичну модель у вигляді передавальної функції за перетворенням Лапласа.

5 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПЕРЕВІРКА АДЕКВАТНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПІДВОДНОГО РОБОТА

Для дослідження отриманих у попередньому розділі математичних моделей компонентів підводного робота та перевірки їх адекватності необхідно виконати їх моделювання.

Моделювання виконувалось у програмному пакеті Matlab/Simulink.

5.1 Моделювання динаміки двигунів підводного робота

Отримана вище математична модель динаміки маршових двигунів підводного робота у вигляді передавальної функції (4.19) дозволяє моделювати лише динаміку залежності кутової швидкості обертання двигуна від напруги, яка подається на двигун. Проте, дана модель не враховує та не дозволяє оцінити вплив таких параметрів як момент навантаження на роторі двигуна на його кутову швидкість та струм у колі якоря. Для вирішення цієї проблеми та перевірки адекватності отриманих моделей, необхідно перейти до векторно-матричної моделі маршових двигунів підводного робота у просторі станів. Підставивши чисельні значення параметрів двигуна, які були наведені вище, у формули для переходу до векторно-матричної моделі [20] отримаємо наступну модель маршових двигунів підводного робота у просторі станів.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{C_e}{L} \\ \frac{C_e}{J} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -807,6923 & -7,6028 \\ 7,9069 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 192,3077 & 0 \\ 0 & -200 \end{bmatrix}, \quad (5.2)$$

$$\mathbf{C} = [1 \quad 1], \quad \mathbf{D} = [0]. \quad (5.3)$$

Така модель дозволяє оцінити вплив моменту навантаження на кутову швидкість та струм якоря, а потім порівняти отримані результати моделювання із паспортними даними двигуна і таким чином перевірити адекватність отриманої моделі. На рисунку 5.1 наведено модель перевірки адекватності моделей динаміки маршових двигунів підводного робота у вигляді передавальної функції та моделі у просторі станів у програмному пакеті Matlab/Simulink. Модель у вигляді передавальної функції (4.19) реалізує блок «Transfer Fcn», а значення матриць моделі простору станів (5.1-5.3) введені як параметри блоку «State Space», що входить до складу підсистеми «SS model».

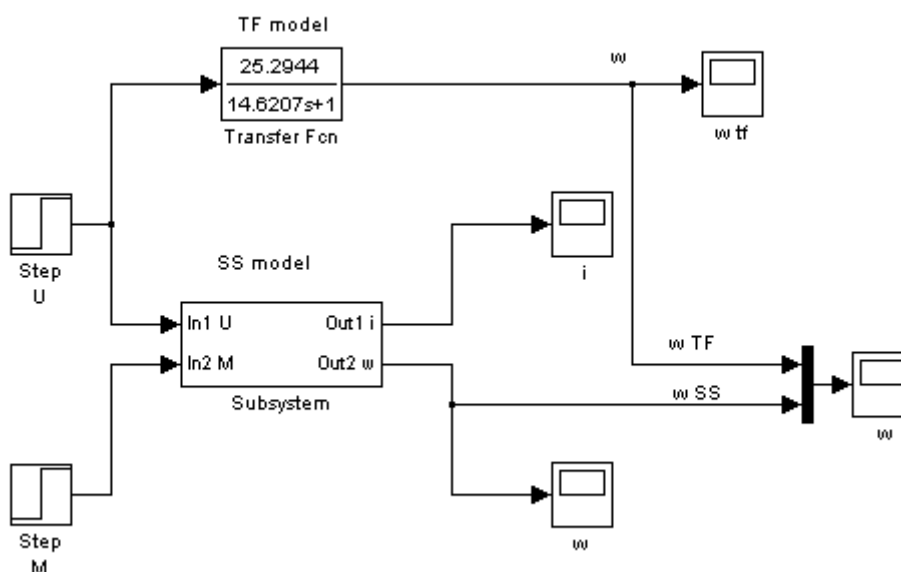


Рисунок 5.1 – Перевірка адекватності моделей динаміки маршових двигунів підводного робота

Модель (рисунок 5.1) працює наступним чином. У момент часу $t_0 = 0$ відбувається ввімкнення двигуна шляхом подачі на нього номінальної напруги $U_{\text{ном}} = 24\text{В}$. До моменту часу $t_1 = 150\text{с}$ двигун працює у режимі ідеального

холостого ходу. Далі у момент часу $t_1 = 150\text{с}$ на нього подається номінальний момент навантаження $M_{\text{ном}} = 0,04\text{Н} \cdot \text{м}$. Від цього моменту часу і до завершення моделювання двигун працює в номінальному режимі. На рисунку 5.2 наведено графіки перехідних процесів маршових двигунів підводного робота для моделі у вигляді передавальної функції та векторно-матричної моделі простору станів.

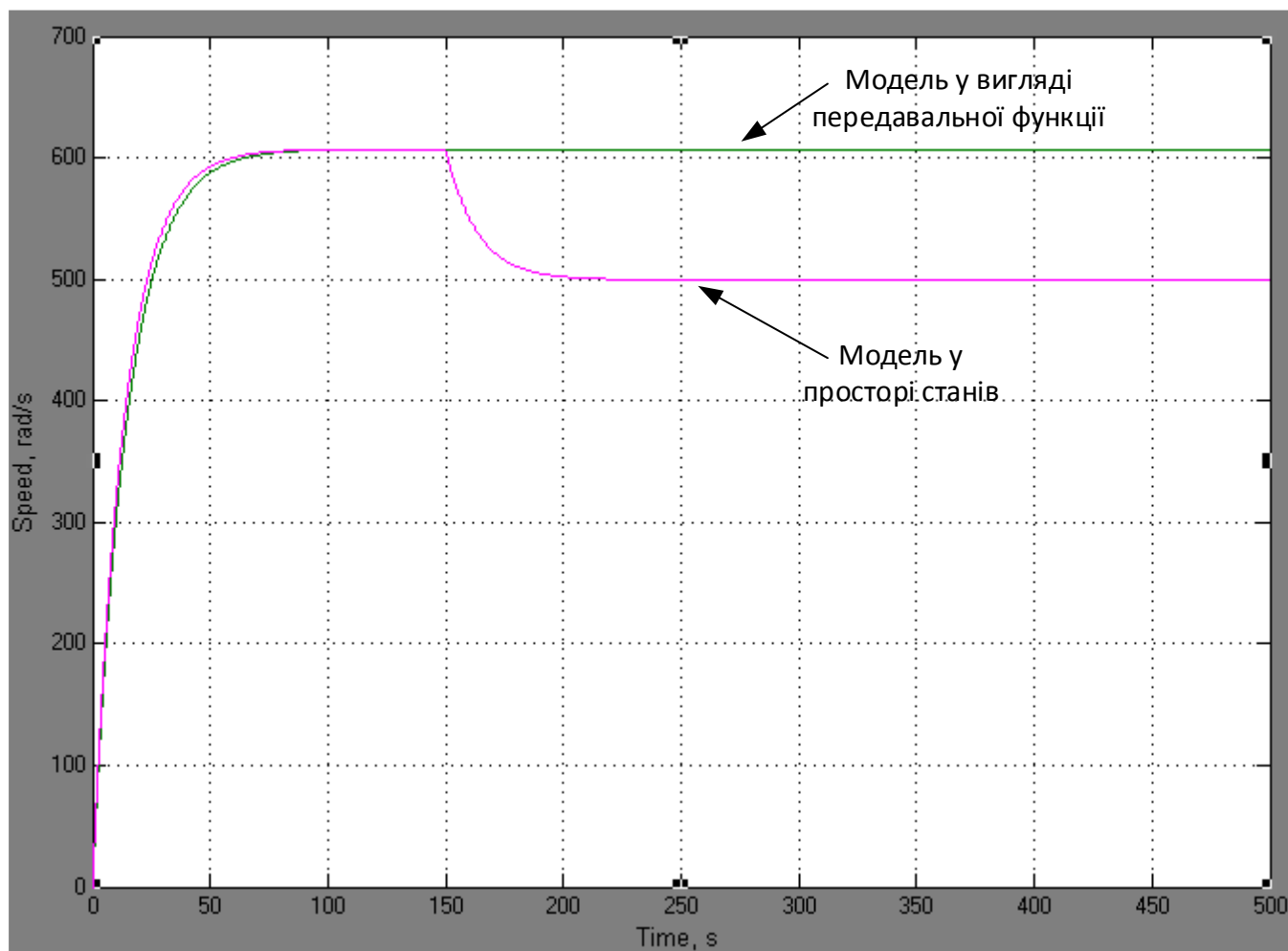


Рисунок 5.2 – Графіки перехідних процесів маршових двигунів підводного робота

З рисунка 5.2 видно, що графіки перехідних процесів обох моделей у режимі ідеального холостого ходу співпадають, що підтверджує еквівалентність обох моделей у цьому режимі.

Після подачі номінального моменту навантаження $M_{\text{ном}} = 0,04\text{Н} \cdot \text{м}$ графіки перехідних процесів для різних моделей не співпадають, що є свідченням того, що

модель у вигляді передавальної функції не враховує вплив моменту навантаження на кутову швидкість. Натомість, модель у просторі станів враховує цю залежність і підтверджує адекватність моделі паспортним даним двигуна: $\omega_0 = 5800 \frac{\text{об}}{\text{хв}} = 607,0667 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $\omega_{\text{ном}} = 4800 \frac{\text{об}}{\text{хв}} = 502,4 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ та паспортним графікам залежності кутової швидкості обертання та струму якоря від моменту навантаження, що наведені на рисунку 5.3.

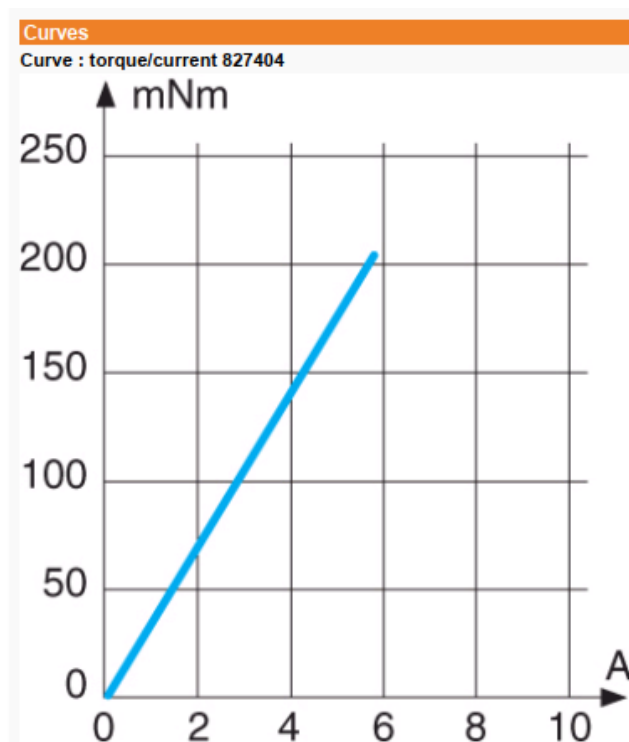
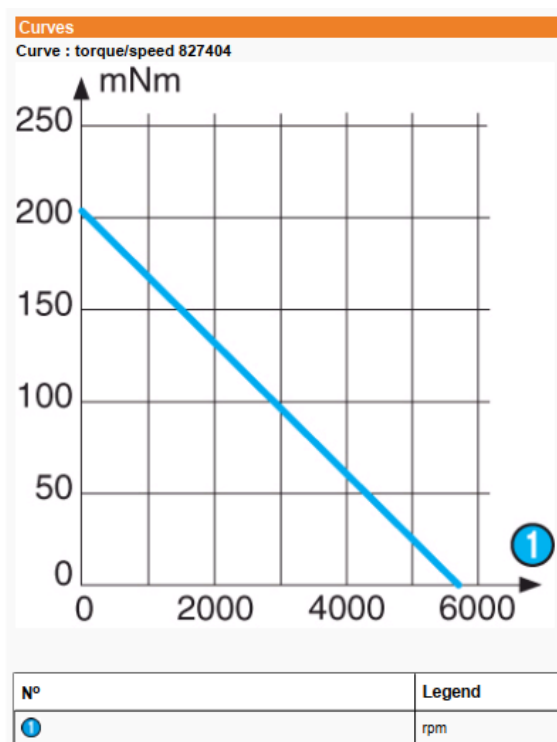


Рисунок 5.3 – Паспортні технічні характеристики маршового двигуна підводного робота [21]

5.2 Моделювання динаміки взаємодії гвинта підводного робота із навколишньою водою

Моделювання динаміки взаємодії гвинта підводного робота із навколишньою водою виконаємо шляхом реалізації залежностей (4.1-4.6) у середовищі Matlab/Simulink. У результаті отримаємо модель, представлену на рисунку 5.4.

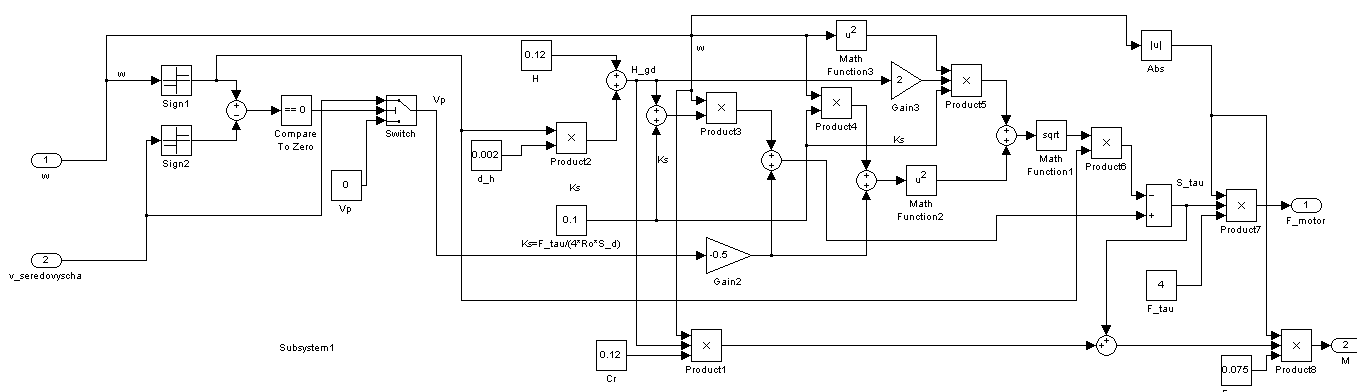


Рисунок 5.4 – Модель динаміки взаємодії гвинта підводного робота із навколишньою водою

Моделювання виконуватимемо при нульовій швидкості течії навколишньої води подавши на вхід моделі лінійно зростаючий сигнал кутової швидкості. Таким чином отримаємо графіки залежності сили тяги маршових двигунів та моменту навантаження на двигун (чи його редуктор) від кутової швидкості обертання гвинта. Отримані у результаті моделювання графіки наведено на рисунку 5.5.

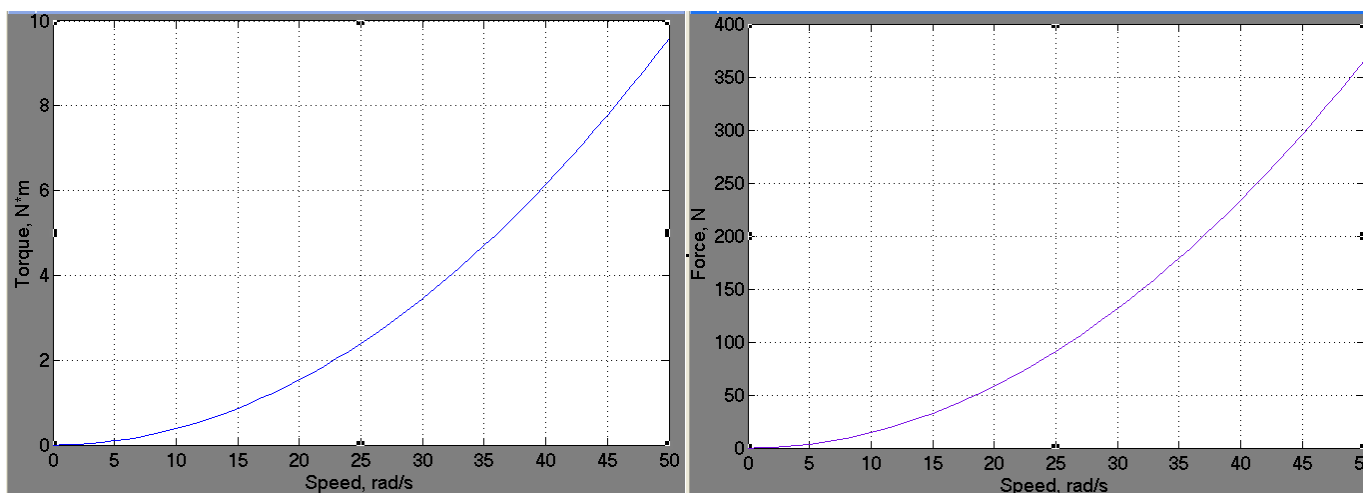


Рисунок 5.5 – Графіки залежності сили тяги маршових двигунів та моменту від кутової швидкості обертання гвинта підводного робота

З графіків бачимо, що чисельні значення сил тяги на графіку справа співмірні з величиною ваги робота, тобто не є якимись аномально малими чи великими, що може підтверджувати адекватність розглянутої моделі.

5.3 Моделювання динаміки сил опору руху підводного робота

Для моделювання динаміки сил опору руху підводного робота використаємо наступну залежність [19].

$$F_{\text{оп}} = K_1 \cdot v \cdot \sigma + K_2 \cdot v \cdot |v| \cdot \sigma', \quad (5.4)$$

$$\sigma' = 1 - \sigma, \quad (5.5)$$

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |v| < v_{\text{кр}} \\ 0, & \text{якщо } |v| \geq v_{\text{кр}} \end{cases}, \quad (5.6)$$

де

K_1, K_2 – гідродинамічні коефіцієнти в'язкого тертя;

v – швидкість руху підводного робота;

$v_{\text{кр}}$ – деяке граничне значення швидкості, що визначає режим обтікання водою підводного робота.

Модель у Matlab/Simulink, що реалізує залежність сил опору руху робота від його швидкості, наведено на рисунку 5.6.

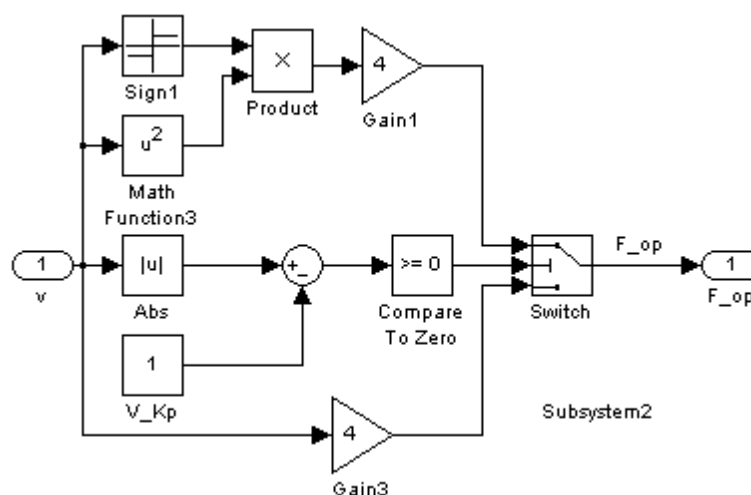


Рисунок 5.6 – Модель залежності сил опору руху підводного робота від швидкості

Подавши на вхід даної підсистеми лінійно зростаючий сигнал, на виході отримано графік залежності сил опору руху підводного робота від його швидкості, який наведено на рисунку 5.7.

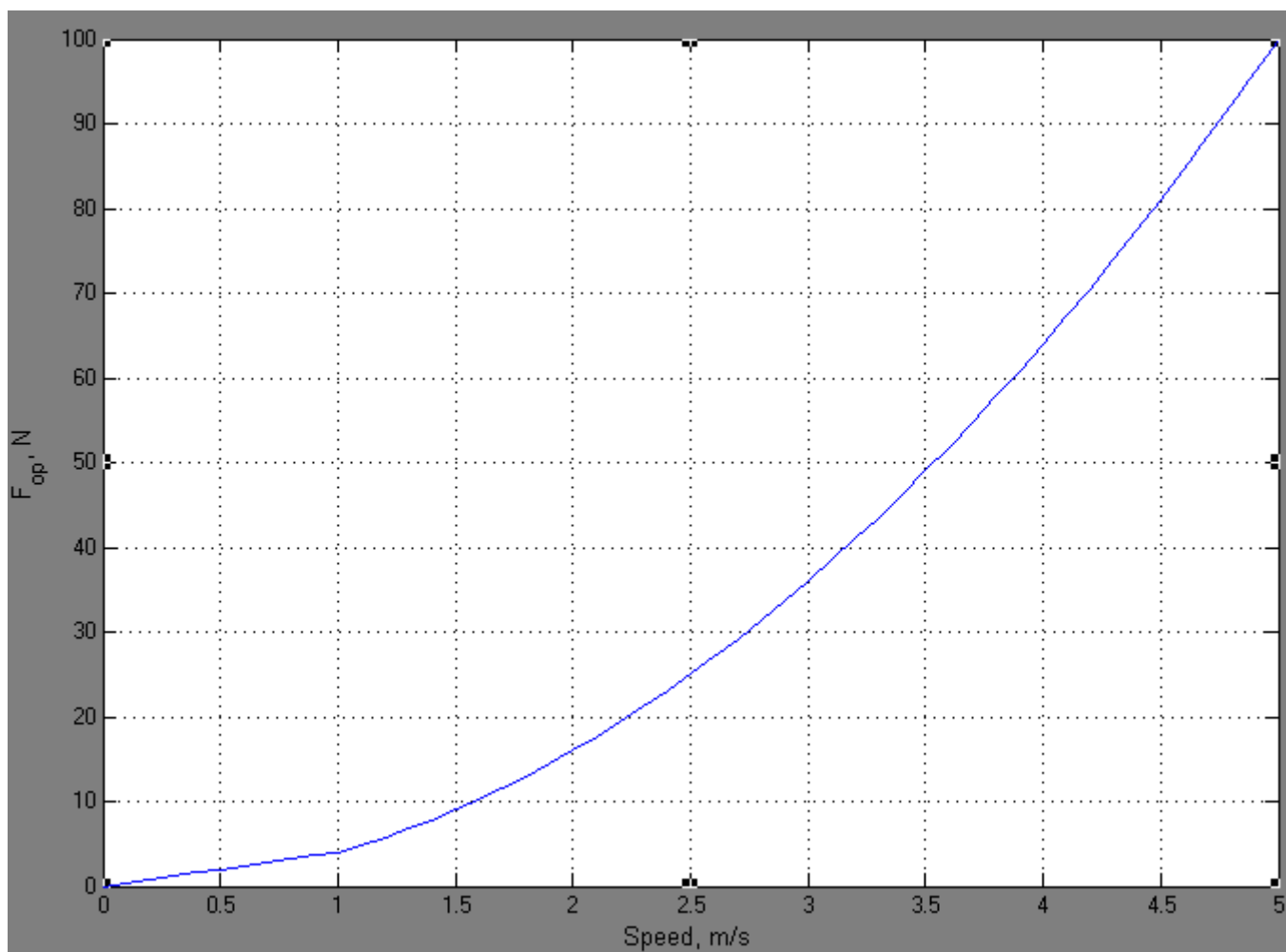


Рисунок 5.7 – Графік залежності сил опору руху підводного робота від його швидкості

5.4 Моделювання динаміки підводного робота

Для отримання адекватної моделі всього підводного робота включимо кожен з отриманих вище моделей до свого блоку «Subsystem», а їх у свою чергу об'єднаємо в єдину систему відповідно до структурної схеми (рисунок 4.1). Отримана модель і буде моделлю динаміки рушійного комплексу реального підводного робота. Входом такої моделі є напруга керування маршовим двигуном, а виходом – швидкість маршового руху підводного робота. Схему отриманої таким чином моделі наведено на рисунку 5.8.

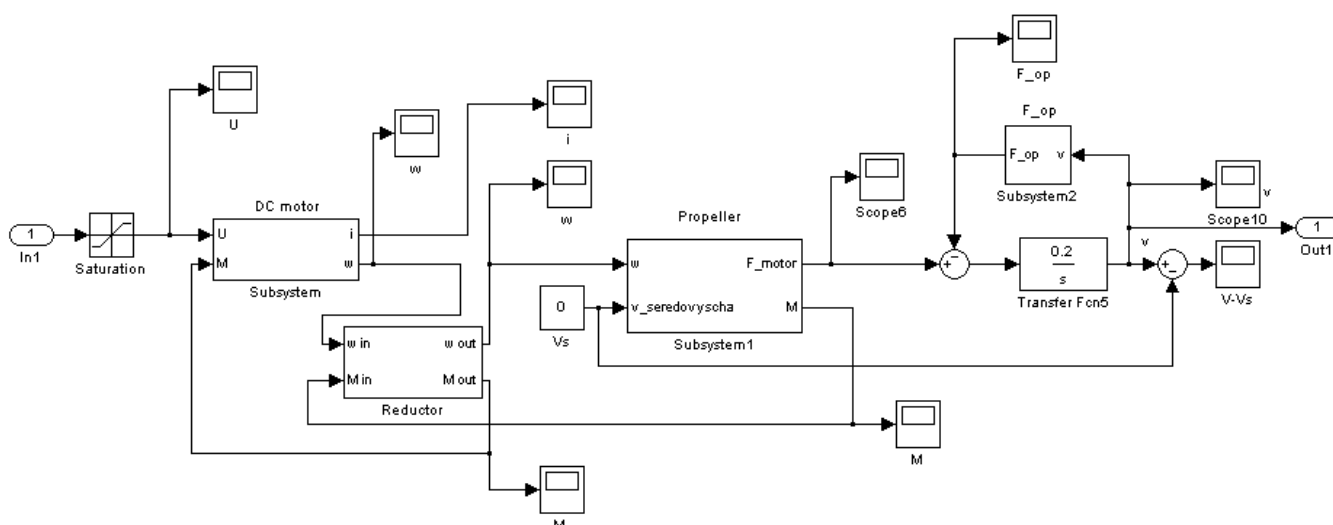


Рисунок 5.8 – Модель динаміки підводного робота

У розглянутій вище моделі динаміки підводного робота присутня ще підсистема, яка є математичною моделлю редуктора двигуна з коефіцієнтом передачі $K=10$. Математичну модель двигуна та редуктора, які входять до складу відповідних підсистем, наведено на рисунку 5.9.

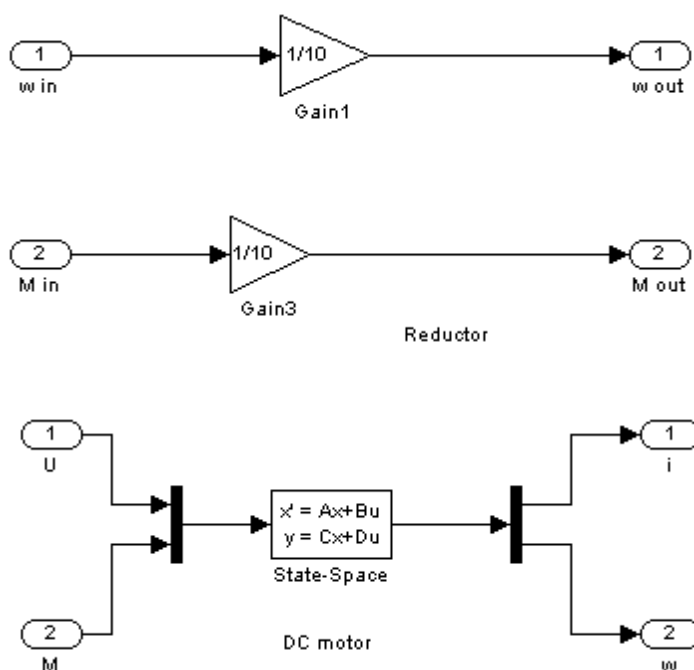


Рисунок 5.9 – Модель редуктора та двигуна підводного робота

Використовуючи модель динаміки підводного робота (рисунок 5.8) можна перевірити адекватність цієї моделі шляхом моделювання простого увімкнення двигуна робота. При подачі номінальної напруги на маршовий двигун, реальний робот повинен був би попливти, поступово збільшуючи свою швидкість від 0 до деякого постійного значення, якого він досягне в той момент, коли сили опору руху стануть рівними силі тяги, яку розвиває двигун. А далі робот повинен продовжувати рух із цією швидкістю до тих пір, поки не вимкнеться двигун, або певні зовнішні сили не вплинуть на його рух.

Для перевірки адекватності моделі виконаємо моделювання увімкнення двигуна шляхом подачі на нього номінальної напруги $U_{\text{ном}} = 24\text{В}$ у системі без зворотних зв'язків. У результаті отримаємо графік залежності швидкості руху робота від часу, який наведено на рисунку 5.10.

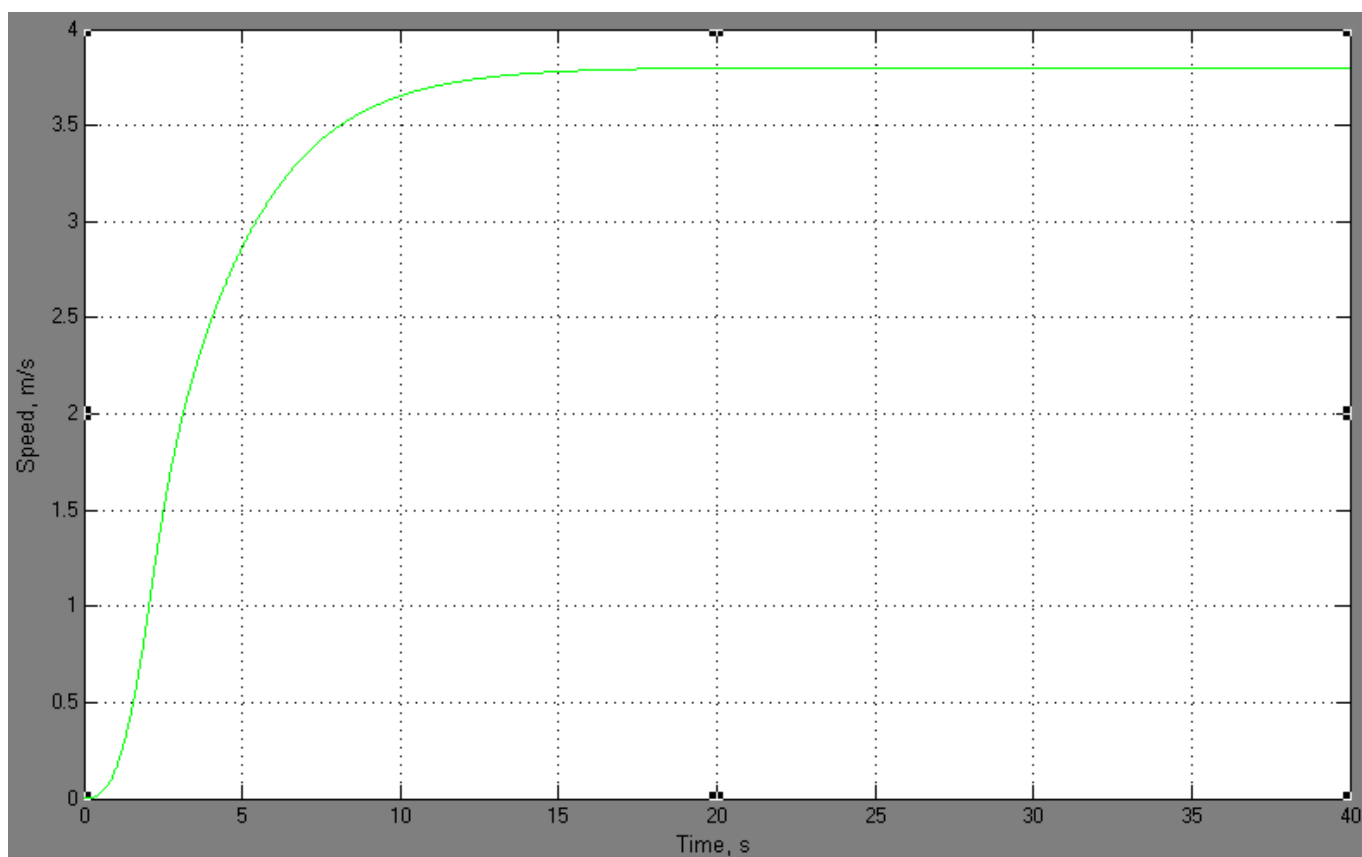


Рисунок 5.10 – Графік залежності швидкості руху підводного робота від часу

З графіка (рисунок 5.10) видно, що у момент подачі на один маршовий двигун напруги живлення, робот починає рух, збільшуючи свою швидкість від 0 до 3,8м/с, а далі продовжує рухатись із сталою швидкістю. Така поведінка моделі динаміки підводного робота підтверджує її адекватність. З графіка також робимо висновок, що один із двох маршових двигунів потужністю $P = 30\text{Вт}$, працюючи сам в режимі, у якому момент навантаження та струм якоря значно перевищують номінальні, може за 20с розігнати підводного робота масою 5кг до швидкості 3,8м/с.

Останнім кроком перевірки адекватності моделей буде перевірка адекватності спрощеної моделі підводного робота шляхом порівняння її із моделлю динаміки реального робота. Також на даному етапі необхідно дослідити якість процесів керування швидкістю у замкненій системі та зробити висновок про доцільність синтезу регулятора.

На рисунку 5.11 наведено порівняльну модель замкнених систем із моделлю реального робота (без урахування зовнішніх збурень) зі спрощеною моделлю у вигляді передавальної функції.

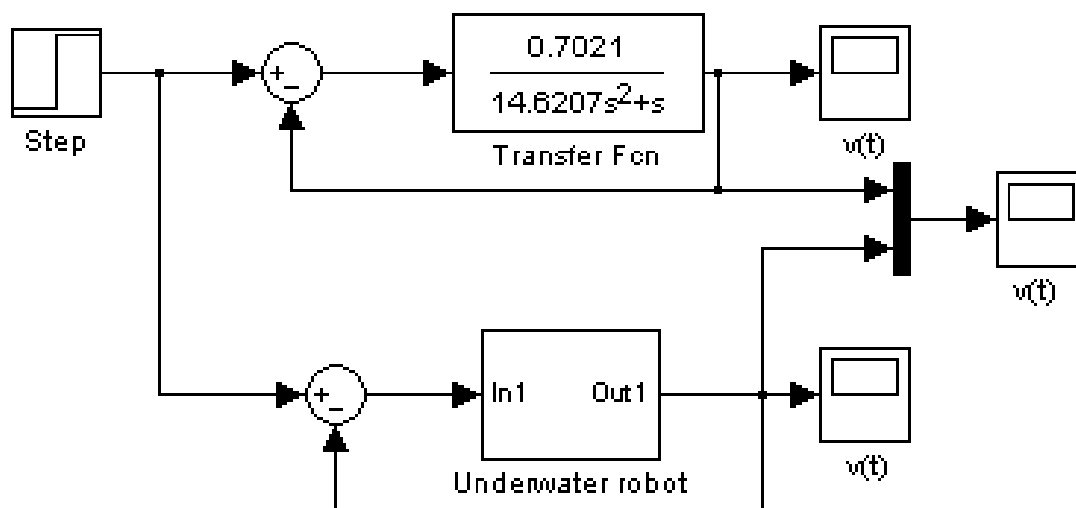


Рисунок 5.11 – Порівняння моделі у вигляді передавальної функції із моделлю реального підводного робота

Графіки перехідних процесів у замкненій системі із спрощеною моделлю у вигляді передавальної функції для синтезу адаптивного регулятора та моделлю реального робота, отримані в результаті моделювання наведено на рисунку 5.12.

Із часових характеристик динаміки підводного робота (рисунок 5.12) видно, що спрощена наближена модель відрізняється від моделі динаміки реального підводного робота іншими амплітудо-частотними характеристиками.

Також із даного графіка видно показники якості перехідного процесу для кожної із моделей. Розглянемо їх детально. Показники якості у замкненій системі без регулятора на базі реальної моделі наступні:

- Час перехідного процесу $t_{пп} = 90\text{с}$;
- Перерегулювання $\sigma = \frac{h_{max} - h_{ст}}{h_{ст}} 100\% = 87,4\%$;
- Усталена похибка $\varepsilon_{уст}(t) = 0$.

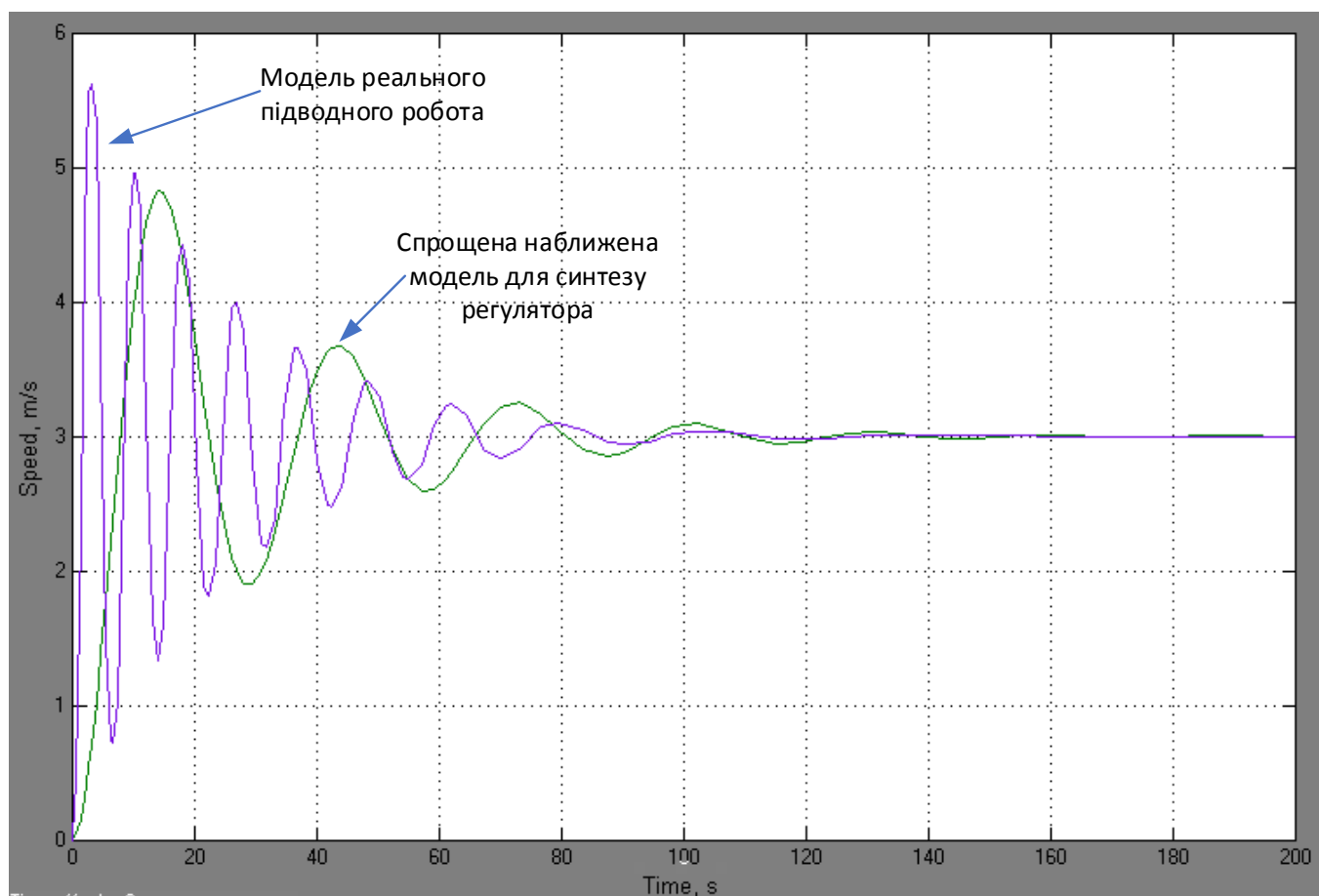


Рисунок 5.12 – Часові характеристики динаміки підводного робота

Показники якості у замкненій системі без регулятора на базі наближеної моделі:

- Час перехідного процесу $t_{пп} = 105\text{с}$;
- Перерегулювання $\sigma = \frac{h_{max}-h_{ст}}{h_{ст}} 100\% = 60,6\%$;
- Усталена похибка $\varepsilon_{уст}(t) = 0$.

Як видно з Рисунка 5.12 розбіжність моделі реального підводного робота та спрощеної наближеної моделі складає 20%.

На основі наведених вище показників якості перехідного процесу та факту того, що деякі параметри підводного робота будуть змінюватись у процесі його експлуатації робимо висновок про необхідність синтезу адаптивної системи керування.

Висновки до розділу 5

Перевірка адекватності математичної моделі підводного робота показала наступне:

- а) підтверджена адекватність моделі маршових двигунів паспортним технічним характеристикам з урахуванням впливу моменту навантаження на кутову швидкість та струм якоря двигуна;
- б) при моделюванні динаміки реального підводного робота та спрощеної моделі спостерігалось 20% розугодження адекватності;
- в) для зведення до мінімуму величини розугодження необхідне розроблення адаптивної системи керування.

6 РОЗРОБЛЕННЯ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПІДВОДНИМ РОБОТОМ

6.1 Синтез адаптивної системи керування на базі функцій Ляпунова відомим методом

На базі структурної схеми, яка представлена у розділі 1 (рисунок 1.4), розроблена структура адаптивної системи (рисунок 6.1)

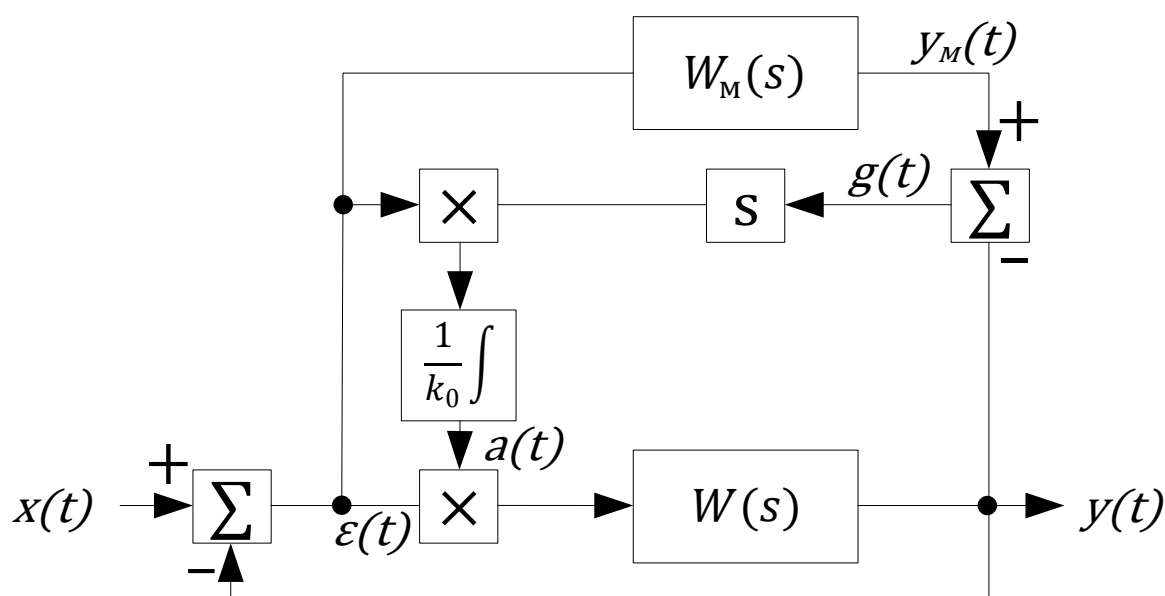


Рисунок. 6.1. – Структурна схема адаптивної системи [22]

При зміні параметрів об'єкта керування контур самонастроювання з еталонною моделлю настраює параметри регулятора так, що динамічні характеристики всієї системи залишаються незмінними та близькими до характеристик еталонної моделі. Таким чином ціль адаптації описується рівнянням [27]:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y_M(t) - y(t)) = 0, \quad (6.1)$$

де

$y_M(t)$ вихід моделі; $y(t)$ вихід об'єкта.

Для реалізації алгоритму роботи контура самонастроювання будується додатно визначена функція Ляпунова, яка забезпечує алгоритм зміни параметрів регулятора за виразом [27]:

$$a = \frac{1}{k_0} \int g_2(t) \cdot \varepsilon(t) dt, \quad (6.2)$$

де a – параметр регулятора;

$g(t)$ – сигнал непогодження;

$\varepsilon(t)$ – помилка керування;

k_0 – змінний коефіцієнт підсилення об'єкту керування.

Розрахунок такого адаптивного регулятора відомим методом передбачає вибір параметрів еталонної моделі та обчислення значення коефіцієнта $\frac{1}{k_0}$ формули (6.2).

Вибір еталонної моделі у цьому випадку необхідно проводити наступним чином: знаменник передавальної функції еталонної моделі обираємо рівним знаменнику передавальної функції об'єкта керування, а чисельник можна вибирати з умови бажаної якості перехідного процесу. Але у випадку, коли об'єкт керування задано передавальною функцією (4.23), то досягти бажаних показників якості в еталонній моделі лише шляхом зміни її коефіцієнту підсилення неможливо (отримуємо або перерегулювання, або великий час перехідного процесу за рахунок великої постійної часу об'єкта керування). Тому у якості еталонної моделі обираємо модель, задану передавальною функцією (6.3), яка забезпечує бажані показники якості перехідного процесу:

$$W_M(s) = \frac{4}{s^2 + 10s}. \quad (6.3)$$

Крім цього значення коефіцієнта $\frac{1}{k_0}$ формули (6.2) відповідно до номінального коефіцієнта підсилення об'єкта керування обираємо рівним $\frac{1}{k_0} = \frac{1}{0,7021} = 1,4243$.

На рисунку 6.2 наведено обрану еталонну модель та графік перехідного процесу в ній.

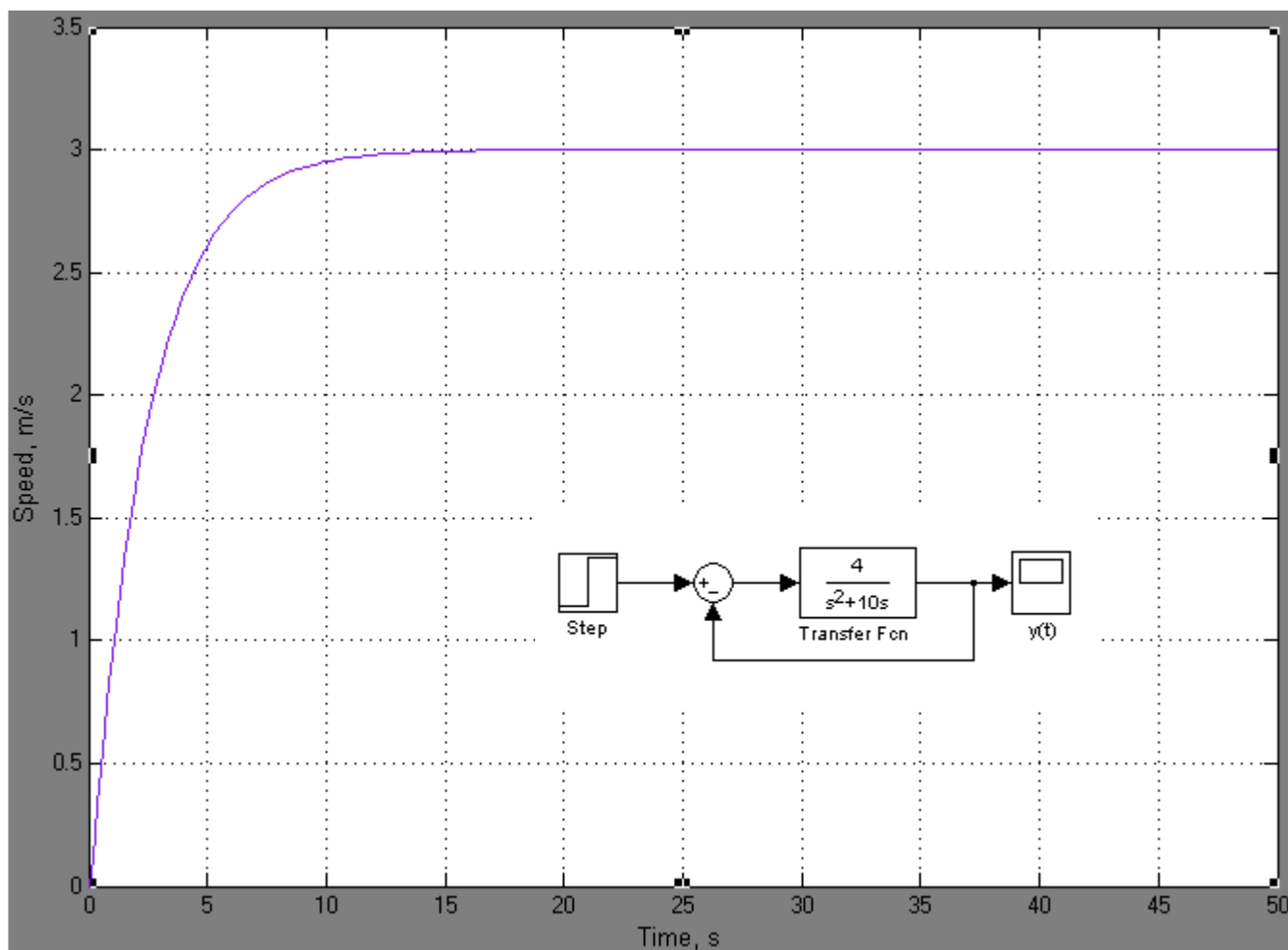


Рисунок 6.2 – Еталонна модель та графік перехідного процесу в ній

З рисунка 6.2 видно основні показники якості перехідного процесу в еталонній моделі:

- Час перехідного процесу $t_{\text{пп}} = 9,5\text{с}$;
- Перерегулювання $\sigma = 0$;
- Усталена похибка $\varepsilon_{\text{уст}}(t) = 0$.

Як бачимо еталонна модель забезпечує бажані показники якості перехідного процесу. Але така модель не відповідає вимогам до синтезу адаптивної системи керування на базі функцій Ляпунова відомим методом. Тому, така ситуація вимагає подальших досліджень.

6.2 Синтез адаптивної системи керування на базі функцій Ляпунова запропонованим методом

Запропонований алгоритм синтезу, який було описано у [20,25,27] полягає у вдосконаленні відомого алгоритму шляхом введення ПД-контролера у прямий канал керування, що дозволить забезпечити швидку збіжність процесу адаптації змінних характеристик об'єкту керування до характеристик моделі.

Для розрахунків параметрів ПД-контролера у прямому каналі керування можна застосовувати, як мінімізацію оцінки ІТАЕ (англ.) [26], так і інші методи, при яких спостерігається адаптація на кінцевому проміжку часу [27]. Однак, наявність різних методів обчислення параметрів ПД-регулятора, які можуть давати різні результати синтезу адаптивної системи керування, вимагає подальших досліджень із визначення який дає більш оптимальний результат по тому чи іншому критерію.

Використання такого підходу до синтезу адаптивної системи керування дозволяє розширити можливості вибору структури та параметрів еталонної моделі, що дозволить обирати еталонну модель виключно на основі бажаних показників якості перехідного процесу незалежно від властивостей об'єкту керування.

Таким чином, для синтезу адаптивної системи керування залишилось обчислити параметри ПД-регулятора, а структуру та параметри еталонної моделі було визначено у попередньому підрозділі.

Оскільки, об'єкт керування має астатичні властивості, то у прямий канал керування необхідно включати ПД-регулятор, так як система вже має інтегральну складову. Це спрощує задачу, оскільки доведеться розраховувати значення не трьох параметрів, як це було б необхідно для ПД-контролера, а тільки двох, що дозволяє

досить легко підібрати їх вручну при моделюванні в Matlab/Simulink. Таким чином підбираємо коефіцієнти пропорційної та диференціальної складових ПД-контролера так, щоб при моделювання графіки перехідних процесів еталонної моделі та адаптивної системи співпали. Знайдені шляхом дослідження значення параметрів ПД-контролера наступні:

$$k_p = 100, \quad k_i = 0, \quad k_d = 250. \quad (6.4)$$

Після знаходження значень параметрів (6.4) необхідно виконати дослідження якості адаптації в синтезованій адаптивній системі керування при зміні коефіцієнта підсилення та сталої часу об'єкта керування.

Висновки до розділу 6

Таким чином, у розділі на базі функцій Ляпунова було розроблено контур самоналагодження, який забезпечує адаптивні властивості досліджуваній системі. Для забезпечення адаптації параметрів системи до параметрів еталонної моделі було розраховано ПД-регулятор.

7 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ СИНТЕЗОВАНОЇ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

7.1 Дослідження впливу зміни коефіцієнта підсилення об'єкта на якість керування

Для перевірки якості процесу адаптації до зміни коефіцієнта підсилення об'єкта керування використаємо модель, наведену на рисунку 7.1.

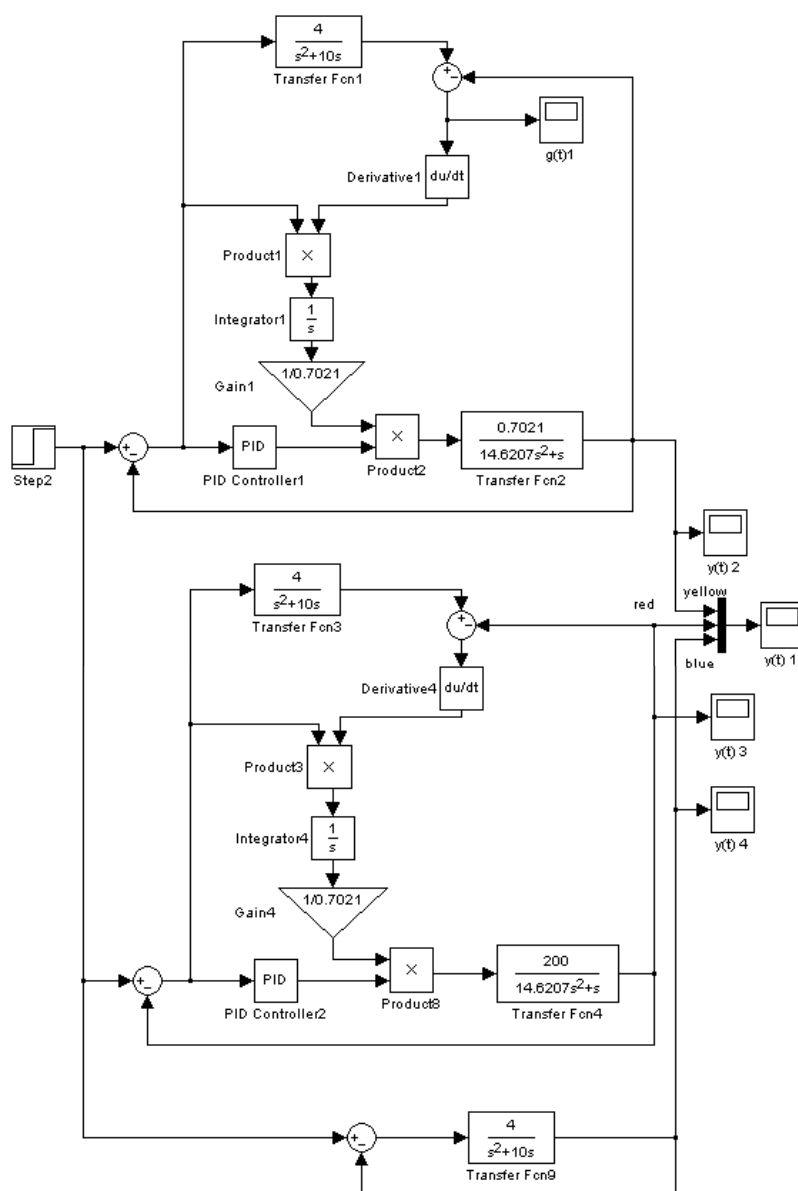


Рисунок 7.1 – Модель досліджуваної системи

Виконаємо моделювання змінивши значення коефіцієнта підсилення об'єкта керування з номінального $k_0 = 0,7021$ до $k_0 = 200$, тобто більше, ніж у 200 разів. Графіки перехідних процесів у всіх трьох моделях, отримані в результаті моделювання зі зміненим коефіцієнтом підсилення наведено на рисунку 7.2.

Як видно з рисунка 7.2, графіки всіх трьох перехідних процесів співпали, що свідчить про високу якість адаптації.

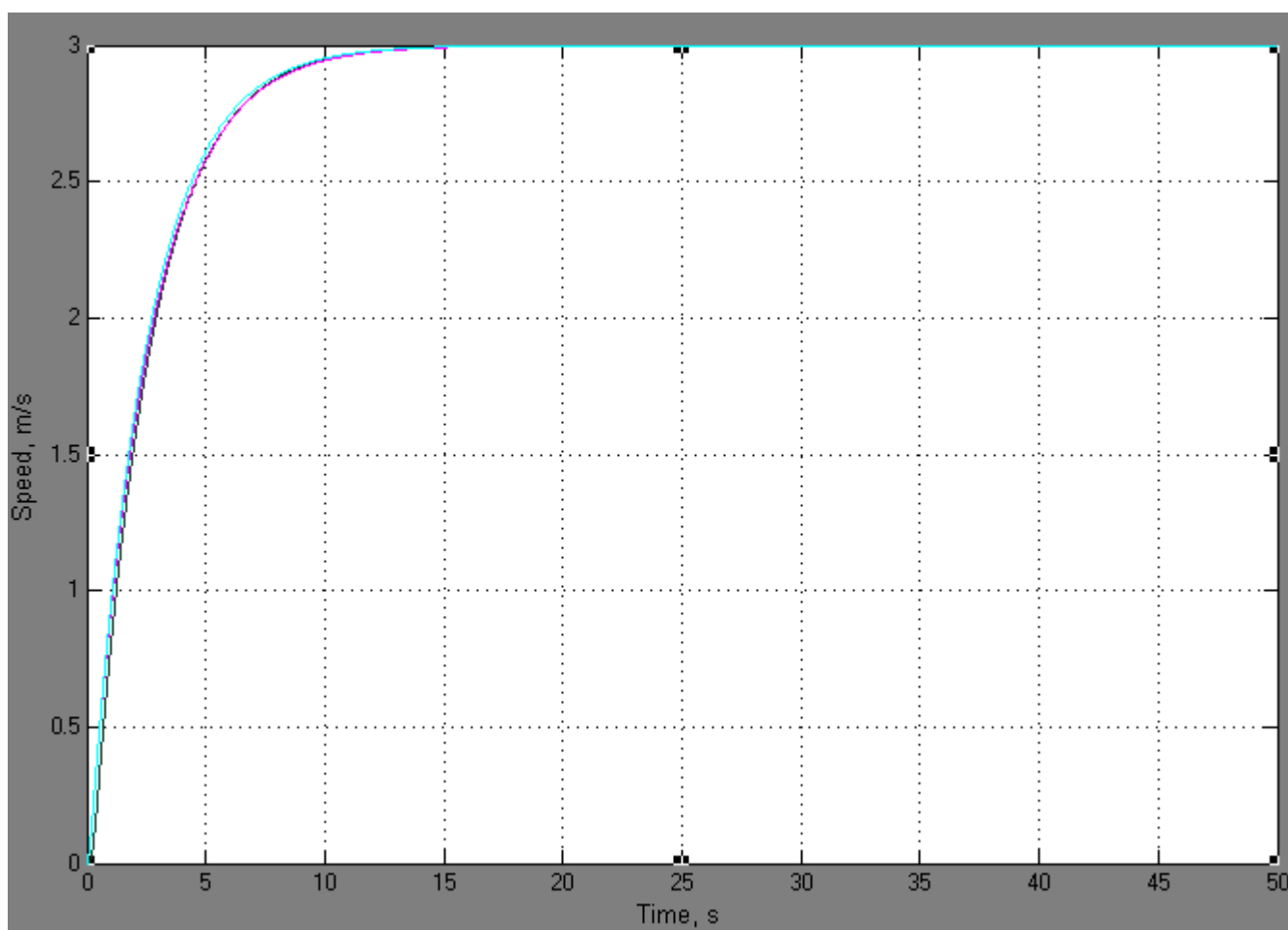


Рисунок 7.2 – Перехідні процеси в адаптивній системі

Для більш ґрунтовного дослідження якості адаптації як до характеристик еталонної моделі, так і до зміни коефіцієнта підсилення системи будемо змінювати значення коефіцієнта k_0 у межах $0,2 \leq k_0 \leq 110$. З розрахунками помилки адаптації до зміни коефіцієнта підсилення та одночасної помилки адаптації до

параметрів моделі. Розрахунки якості адаптації до зміни коефіцієнту підсилення проводились для різних значень часу моделювання (10с, 20с, 24с).

Результати досліджень записані у таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Якість адаптації до зміни коефіцієнта підсилення

Δ	$t = 10с$		$t = 20с$		$t = 24с$	
Δk	Помилка адаптації до зміни k , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни k , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни k , %	Помилка адаптації до моделі, %
-0,60	1,5740	1,5347	0,0247	0,0255	0,0043	0,0047
-0,50	0,6390	0,6018	0,0173	0,0181	0,0035	0,0038
-0,40	0,3516	0,3169	0,0112	0,0120	0,0024	0,0027
-0,30	0,2013	0,1650	0,0070	0,0078	0,0015	0,0019
-0,20	0,1118	0,0754	0,0040	0,0047	0,0009	0,0012
-0,10	0,0469	0,0120	0,0018	0,0025	0,0004	0,0007
0	0	0,0335	0	0,0008	0	0,0003
0,10	0,0355	0,0743	0,0014	0,0005	0,0003	0,0001
0,30	0,0887	0,1260	0,0036	0,0028	0,0008	0,0005
0,50	0,1267	0,1643	0,0053	0,0043	0,0012	0,0009
0,70	0,1531	0,1909	0,0065	0,0053	0,0015	0,0011
0,90	0,1745	0,2104	0,0075	0,0064	0,0018	0,0014
1,10	0,1907	0,2320	0,0083	0,0073	0,0020	0,0016
1,30	0,2056	0,2471	0,0089	0,0079	0,0021	0,0018
1,50	0,2175	0,2596	0,0095	0,0083	0,0023	0,0019
1,70	0,2270	0,2631	0,0101	0,0086	0,0024	0,0020
1,90	0,2358	0,2700	0,0105	0,0091	0,0025	0,0021
2,10	0,2440	0,2760	0,0109	0,0094	0,0026	0,0022
2,30	0,2481	0,2885	0,0112	0,0097	0,0027	0,0023
12,30	0,3371	0,3402	0,0185	0,0153	0,0047	0,0039
22,30	0,3545	0,3339	0,0202	0,0157	0,0052	0,0041
32,30	0,3640	0,3280	0,0186	0,0134	0,0033	0,0020
42,30	0,3689	0,3209	0,0200	0,0145	0,0056	0,0042
52,30	0,3692	0,3153	0,0193	0,0133	0,0058	0,0043
62,30	0,3690	0,3115	0,0139	0,0081	0,0036	0,0022
72,30	0,3668	0,3054	0,0184	0,0123	0,0060	0,0045
82,30	0,3605	0,2993	0,0185	0,0122	0,0000	0,0015
92,30	0,3490	0,2918	0,0196	0,0134	0,0072	0,0057
102,30	0,2728	0,2580	0,0205	0,0164	0,0060	0,0049

З таблиці видно, що помилка адаптації до моделі в середньому складає 0,29% для часу моделювання 10с, для часу моделювання 20с – 0,0098%, для часу моделювання 24с – 0,0024%.

Таким чином, можна констатувати високу якість адаптації системи керування підводним робото.

7.2 Дослідження впливу зміни постійної часу об'єкта на якість керування

Для розширення властивостей запропонованої адаптивної системи були виконані дослідження зміни постійної часу об'єкту керування та її вплив на якість адаптації.

Значення коефіцієнта T_0 змінювалось у межах $0,001 \leq T_0 \leq 50$.

Результати дослідження зведені у таблицю 7.2.

Таблиця 7.2 – Якість адаптації до зміни постійної часу

Δ	$t = 10$		$t = 20$		$t = 24$	
ΔT	Помилка адаптації до зміни T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни T , %	Помилка адаптації до моделі, %
-14,6197	1,0104	0,8366	0,0401	0,0300	0,0096	0,0073
-14,6177	1,0096	0,8368	0,0400	0,0299	0,0096	0,0073
-14,6157	1,0075	0,8355	0,0401	0,0300	0,0097	0,0073
-14,6137	1,0077	0,8365	0,0400	0,0299	0,0096	0,0073
-14,6117	1,0071	0,8366	0,0399	0,0299	0,0097	0,0074
-14,5907	1,0000	0,8365	0,0399	0,0300	0,0095	0,0072
-14,3907	0,9500	0,8300	0,0400	0,0315	0,0084	0,0064
-14,1907	0,8968	0,8105	0,0362	0,0289	0,0053	0,0036
-13,9907	0,8472	0,7855	0,0407	0,0345	0,0145	0,0130
-13,7907	0,8078	0,7676	0,0354	0,0300	0,0102	0,0089
-13,5907	0,7718	0,7493	0,0402	0,0357	0,0131	0,0120
-13,3907	0,7390	0,7300	0,0359	0,0320	0,0080	0,0070
-13,1907	0,7113	0,7132	0,0331	0,0298	0,0133	0,0125
-12,9907	0,6834	0,6937	0,0308	0,0278	0,0079	0,0071
-12,7907	0,6591	0,6776	0,0287	0,0259	0,0071	0,0063

Продовження таблиці 7.2

Δ	$t = 10$		$t = 20$		$t = 24$	
ΔT	Помилка адаптації до зміни T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни T , %	Помилка адаптації до моделі, %
-11,0000	0,5020	0,5378	0,0204	0,0188	0,0050	0,0045
-10,0000	0,4366	0,4711	0,0175	0,0161	0,0042	0,0037
-9,0000	0,3787	0,4111	0,0148	0,0135	0,0035	0,0031
-8,0000	0,3257	0,3618	0,0125	0,0115	0,0030	0,0026
-7,0000	0,2758	0,3168	0,0105	0,0095	0,0025	0,0021
-6,0000	0,2304	0,2713	0,0086	0,0076	0,0020	0,0016
-5,0000	0,1882	0,2231	0,0069	0,0059	0,0016	0,0012
-4,0000	0,1472	0,1854	0,0053	0,0045	0,0012	0,0009
-3,0000	0,1083	0,1466	0,0039	0,0029	0,0009	0,0005
-2,0000	0,0709	0,1107	0,0025	0,0015	0,0006	0,0002
-1,0000	0,0347	0,0770	0,0012	0,0003	0,0003	0,0001
0	0	0,0431	0,0000	0,0009	0,0000	0,0003
1,0000	0,0335	0,0084	0,0010	0,0019	0,0003	0,0006
2,0000	0,0663	0,0257	0,0022	0,0030	0,0005	0,0008
3,0000	0,0983	0,0598	0,0033	0,0039	0,0007	0,0010
4,0000	0,1290	0,0896	0,0042	0,0050	0,0009	0,0013
5,0000	0,1616	0,1219	0,0052	0,0060	0,0011	0,0015
10,3793	0,3181	0,2833	0,0095	0,0103	0,0020	0,0024
15,3793	0,4522	0,4113	0,0127	0,0136	0,0027	0,0030
20,3793	0,5841	0,5464	0,0154	0,0163	0,0031	0,0035
25,3793	0,7100	0,6701	0,0176	0,0184	0,0035	0,0038
30,3793	0,8342	0,7966	0,0194	0,0202	0,0038	0,0041
35,3793	0,9551	0,9155	0,0208	0,0216	0,0040	0,0043

Як видно з таблиці зміна постійної часу у сторону зменшення приблизно 14000 разів та у сторону збільшення у 3 рази дало у часі моделювання 10с помилку адаптації до моделі в середньому 0,4963%, при часі моделювання 20с – 0,0176% та на часі моделювання 24с – 0,0044.

За даними таблиці для наочності результатів адаптації були побудовані графіки залежності помилки адаптації від зміни сталої часу.

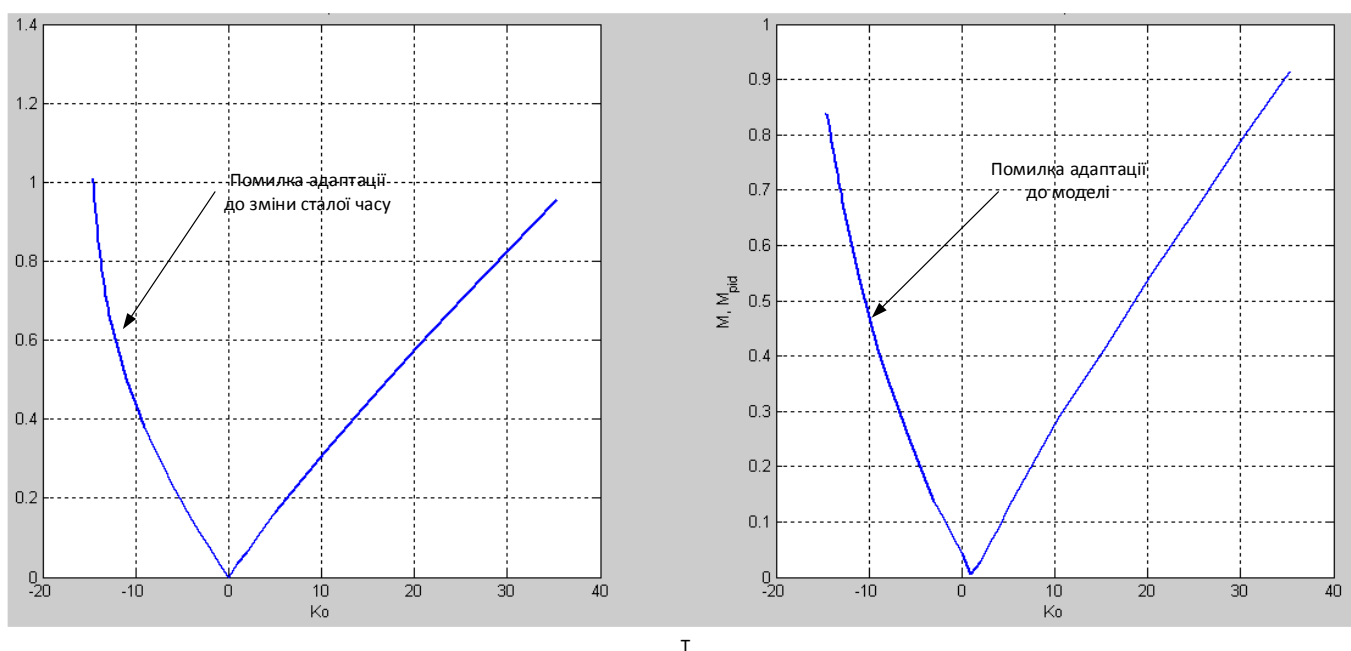


Рисунок 7.3 – Графік залежності помилки адаптації від зміни сталої часу

7.3 Дослідження впливу одночасної зміни як постійної часу, так і коефіцієнта підсилення об'єкта на якість керування

У дисертації наступним етапом експериментальних досліджень було проведено аналіз впливу одночасної зміни як постійної часу так і коефіцієнта підсилення.

Результати досліджень зведені у таблицю 7.3.

Таблиця 7.3 – Одночасна зміна постійної часу і коефіцієнта підсилення

Δ		$t = 10$		$t = 20$		$t = 24$	
ΔK	ΔT	Помилка адаптації до одночасної зміни K і T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до одночасної зміни K і T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до одночасної зміни K і T , %	Помилка адаптації до моделі, %
-0,6921	-14,6107	7,9975	7,8665	0,6543	0,6451	0,2308	0,2286
0,0000	-14,6107	1,0067	0,8367	0,0400	0,0300	0,0097	0,0074
0,2979	-14,6107	0,9042	0,7335	0,0359	0,0258	0,0085	0,0062

Продовження таблиці 7.3

Δ		$t = 10$		$t = 20$		$t = 24$	
ΔK	ΔT	Помилка адаптації до одночасно ї зміни K і T, %	Помилк а адаптаці ї до моделі, %	Помилка адаптації до одночасн ої зміни K і T, %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилк а адаптаці ї до одночас ної зміни K і T, %	Помилка адаптаці ї до моделі, %
4,2979	-14,6107	0,6294	0,4561	0,0255	0,0154	0,0060	0,0036
9,2979	-14,6107	0,5705	0,3965	0,0234	0,0133	0,0055	0,0031
-0,6921	-14,5907	7,9131	7,8244	0,6399	0,6320	0,2234	0,2216
0,0000	-14,5907	0,9996	0,8360	0,0397	0,0299	0,0097	0,0074
0,2979	-14,5907	0,8996	0,7343	0,0357	0,0258	0,0085	0,0062
4,2979	-14,5907	0,6281	0,4570	0,0255	0,0154	0,0060	0,0037
9,2979	-14,5907	0,5699	0,3972	0,0234	0,0133	0,0055	0,0032
-0,6921	-13,5907	5,8528	5,8936	0,3573	0,3566	0,1116	0,1113
0,0000	-13,5907	0,7716	0,7493	0,0404	0,0359	0,0074	0,0063
0,2979	-13,5907	0,7121	0,6716	0,0314	0,0261	0,0066	0,0053
4,2979	-13,5907	0,5594	0,4552	0,0265	0,0187	0,0088	0,0070
9,2979	-13,5907	0,5303	0,4042	0,0224	0,0138	0,0054	0,0034
-0,6921	-12,5907	4,1351	4,1767	0,1599	0,1591	0,0419	0,0416
0,0000	-12,5907	0,6362	0,6606	0,0273	0,0247	0,0067	0,0060
0,2979	-12,5907	0,5994	0,6059	0,0266	0,0234	0,0070	0,0062
4,2979	-12,5907	0,5058	0,4416	0,0231	0,0167	0,0046	0,0030
9,2979	-12,5907	0,4873	0,3956	0,0246	0,0172	0,0070	0,0053
-0,6921	-10,0000	0,1956	0,1540	0,0584	0,0592	0,0046	0,0049
0	-10,0000	0,4375	0,4686	0,0175	0,0161	0,0042	0,0037
0,2979	-10,0000	0,4293	0,4700	0,0180	0,0163	0,0044	0,0039
4,2979	-10,0000	0,4230	0,4080	0,0228	0,0186	0,0071	0,0061
9,2979	-10,0000	0,4230	0,3756	0,0247	0,0192	0,0072	0,0059
-0,6921	-5,0000	6,4407	6,3962	0,2886	0,2877	0,3832	0,3829
0,0000	-5,0000	0,1877	0,2287	0,0069	0,0059	0,0016	0,0012
0,2979	-5,0000	0,2359	0,2775	0,0094	0,0085	0,0022	0,0019
4,2979	-5,0000	0,3393	0,3618	0,0162	0,0136	0,0041	0,0034
9,2979	-5,0000	0,3631	0,3568	0,0177	0,0140	0,0060	0,0051
-0,6921	0	7,9144	7,8697	0,2783	0,2775	1,5591	1,5588
0,0000	0	0,0000	0,0417	0,0003	0,0007	0,0000	0,0003
0,2979	0	0,0887	0,1260	0,0036	0,0028	0,0008	0,0005
4,2979	0	0,2908	0,3183	0,0136	0,0117	0,0033	0,0027
9,2979	0	0,3252	0,3389	0,0166	0,0136	0,0040	0,0033

Продовження таблиці 7.3

Δ		$t = 10$		$t = 20$		$t = 24$	
ΔK	ΔT	Помилка адаптації до одночасної зміни K і T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до одночасної зміни K і T , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до одночасної зміни K і T , %	Помилка адаптації до моделі, %
-0,6921	10,3793	2,9809	2,9387	4,1483	4,1490	3,5927	3,5924
0,0000	10,3793	0,3186	0,2839	0,0095	0,0104	0,0020	0,0024
0,2979	10,3793	0,1574	0,1155	0,0048	0,0056	0,0010	0,0014
4,2979	10,3793	0,2081	0,2506	0,0098	0,0083	0,0024	0,0019
9,2979	10,3793	0,2703	0,3034	0,0132	0,0110	0,0032	0,0026
0	25,3793	0,7098	0,6698	0,0176	0,0185	0,0035	0,0038
0,2979	25,3793	0,4540	0,4176	0,0126	0,0134	0,0026	0,0029
4,2979	25,3793	0,1137	0,1556	0,0058	0,0048	0,0014	0,0010
9,2979	25,3793	0,2149	0,2504	0,0103	0,0086	0,0025	0,0020

З даних таблиці можна зробити висновок, що помилка адаптації у середньому не перевищує 1%, хоча 6 випадках спостерігалась помилка не більше 8%.

7.4 Дослідження роботи двигуна та якості процесів керування на моделі реального підводного робота

На моделі двигуна, розробленій у розділі 5 досліджувались наступні часові характеристики режиму роботи двигуна: залежність струму $i(t)$ моменту навантаження $M(t)$, кутової швидкості $\omega(t)$ та керуючої напруги $u(t)$ від часу.

Результати дослідження представлені на рисунку 7.4.

На розробленій у дисертації моделі динаміки підводного робота (рисунок 5.8) виконувалось дослідження часових характеристик синтезованої адаптивної системи керування відомим методом та запропонованої адаптивної системи.

Мета такого дослідження полягала у порівнянні якості адаптації та перевірці ідеї компенсації 20% розугодження реальної та наближеної моделей.

Результати такого дослідження представлені на рисунках 7.5-7.6.

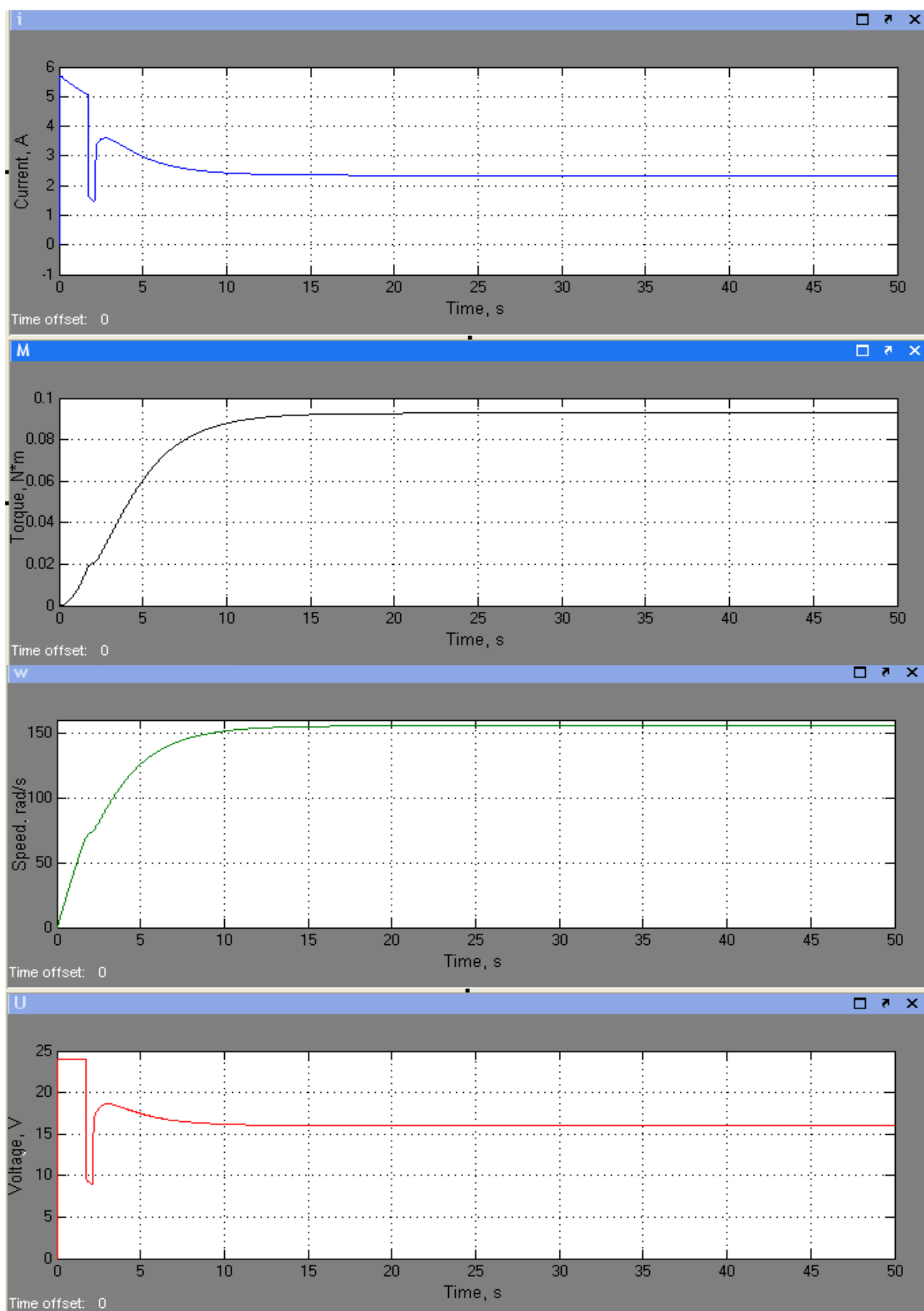


Рисунок 7.4 – Часові характеристики режиму роботи двигуна

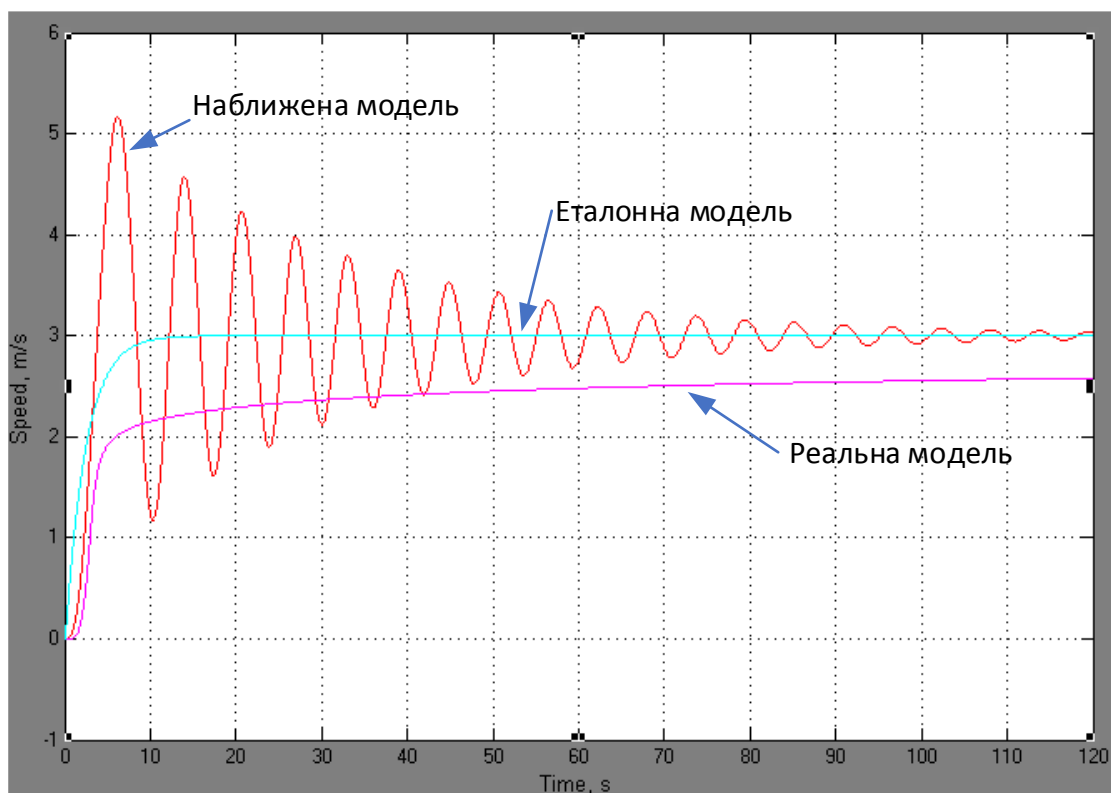


Рисунок 7.5 – Часові характеристик адаптивної системи керування підводним роботом, синтезованої відомим методом

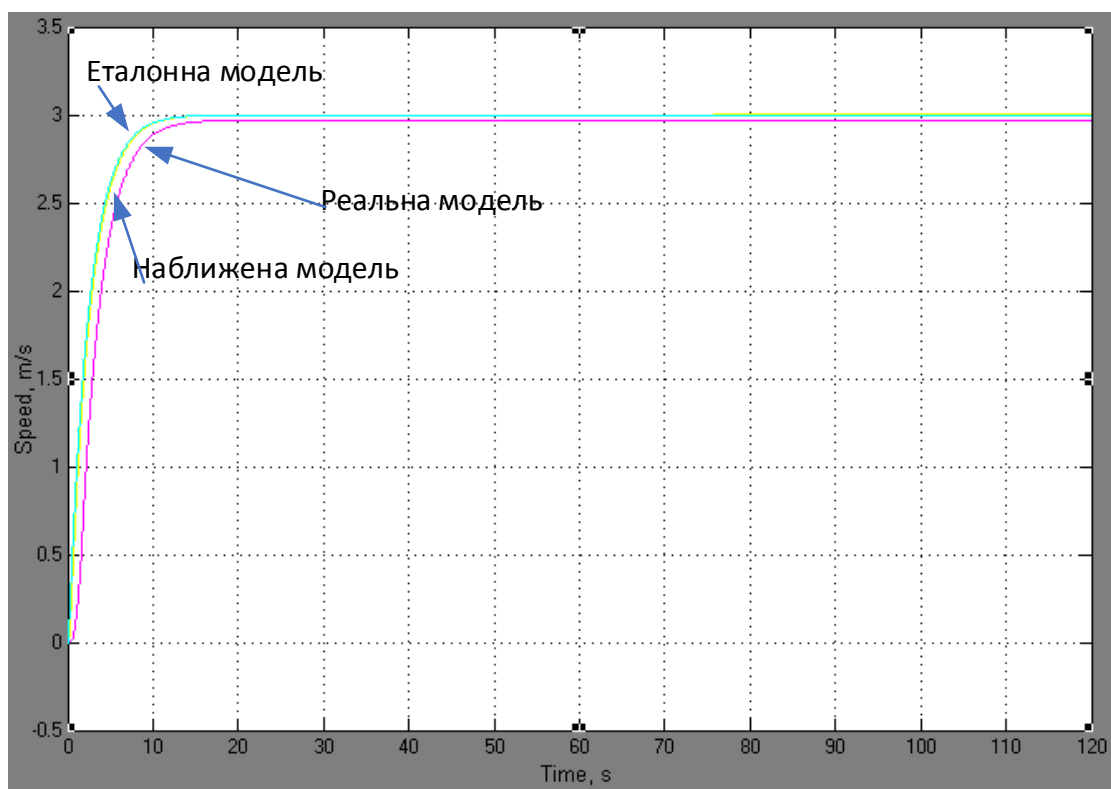


Рисунок 7.6 – Часові характеристик адаптивної системи керування підводним роботом, синтезованої запропонованим методом

Як видно з графіків, запропонований метод адаптації зводить розумодження моделей практично до нуля, що має велике значення для інженерних розрахунків подібних систем керування.

7.5 Дослідження роботи адаптивної системи керування при одночасній роботі двох маршових двигунів підводного робота

Для дослідження якості роботи синтезованої адаптивної системи керування підводним роботом із двома маршовими двигунами при їх одночасній роботі була розроблена модель адаптивної системи, представлена на рисунку 7.7.

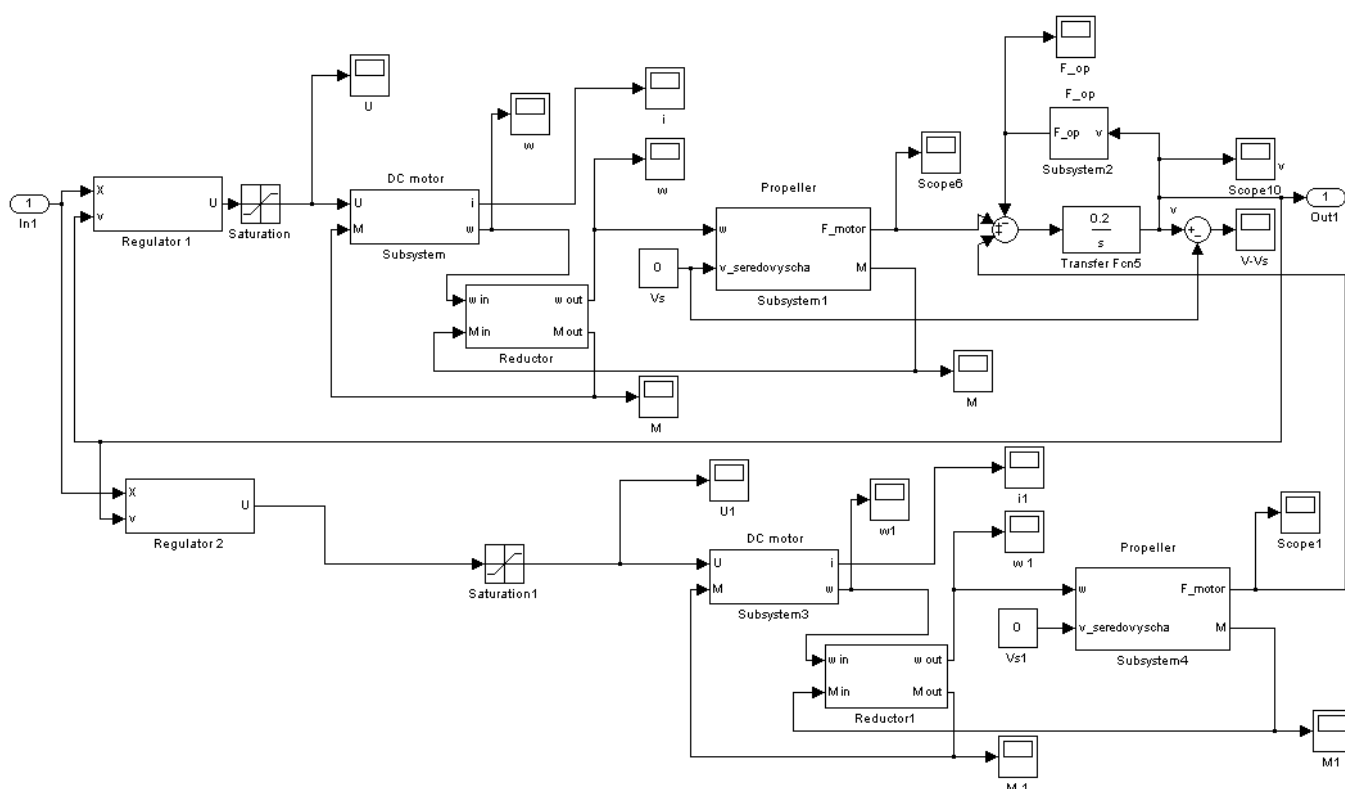
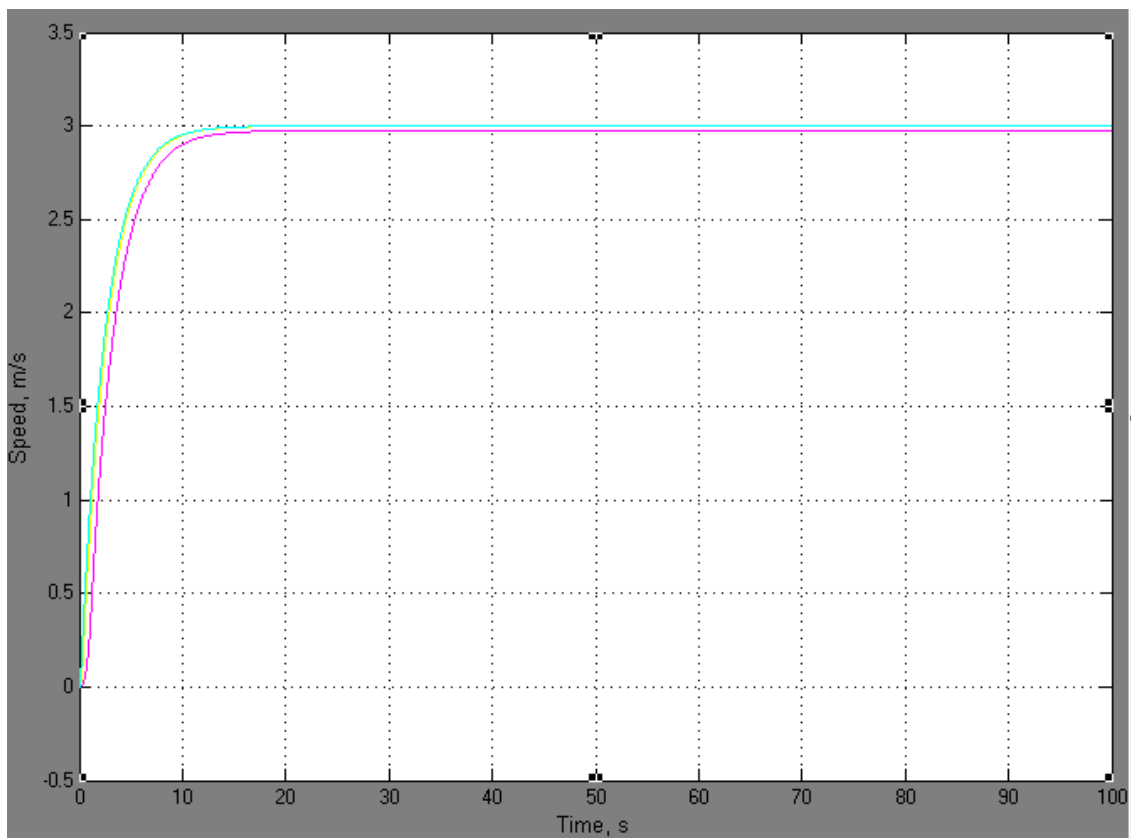


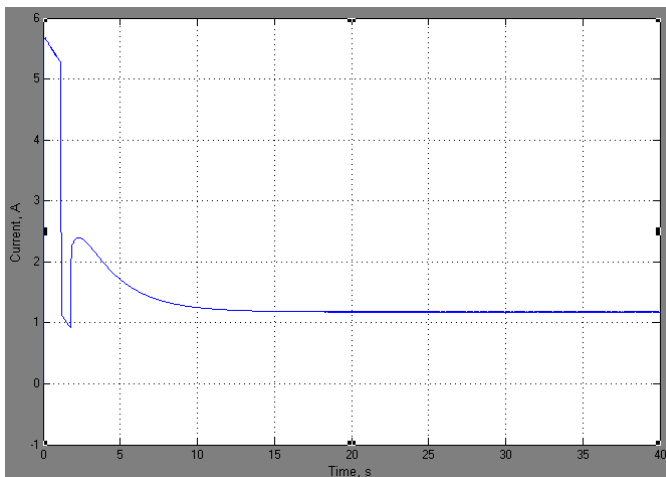
Рисунок 7.7 – Модель адаптивної системи керування з двома маршовими двигунами

Експерименти проводилися з метою дослідження одночасної роботи двох маршових двигунів та взаємного впливу обох каналів керування на якість адаптивної системи керування.

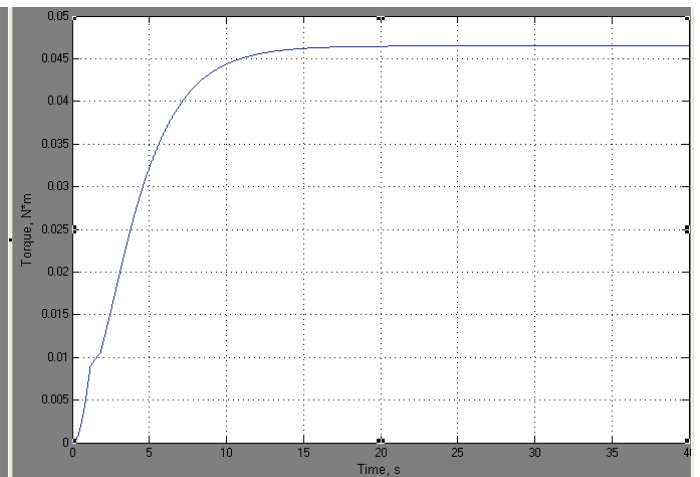
Часові характеристики роботи адаптивної системи представлені на рисунку 7.8.а), б), в)



а)



б)



в)

Рисунок 7.8 – Часові характеристики роботи адаптивної системи:

- а) швидкість, яку розвиває підводний робот;
- б) номінальний струм маршових двигунів;
- в) робочий номінальний момент двигунів

Технічні параметри, отримані на досліджуваній моделі повністю співпадають з паспортними технічними даними.

Висновки до розділу 7

Таким чином, проведені дослідження на розроблених моделях складових та адаптивної системи керування в цілому показали: по-перше адекватність розроблених моделей реальним технічним пристроям. Отримані результати моделювання повністю збігаються з паспортними даними технічних пристроїв; по-друге запропонований метод синтезу адаптивної системи з використанням функцій Ляпунова та вбудованим ПД-регулятором дозволив використовувати для моделювання спрощену математичну модель, що має велику цінність в інженерних дослідженнях; по-третє як показали проведені експериментальні дослідження, помилка адаптації до зміни коефіцієнта підсилення та сталої часу складає у середньому 0,82%.

8 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ «БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ ПІДВОДНИЙ РОБОТ»

8.1 Опис ідеї стартап-проекту

Ідея стартап-проекту полягає у створенні багатофункціонального підводного робота, здатного до роботи у автономному та телекерованому режимах з виконанням функцій переміщення, моніторингу екологічного стану води, фото та відео зйомки, обстеження рельєфу дна.

Опис ідеї, напрямків застосування стартап-проекту, а також вигоди для користувача проаналізовано в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
	1. Екологічні дослідження	Здешевлення та спрощення екологічних досліджень за рахунок використання замість величезної кількості датчиків, розставлених по всій водоймі, відносно невеликої кількості підводних роботів, здатних контролювати всю водойму або навіть багато водойм одночасно.
	2. Картографування рельєфу дна	Розширення можливостей картографування за рахунок одночасної гідроакустичної та фотозйомки, а також можливості швидко охопити великі площі завдяки одночасному використанню кількох роботів, які координують свої дії між собою.

Продовження таблиці 8.1

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
	3. Аматорська підводна зйомка	Збільшення доступності для широкого кола аматорів підводної зйомки професійної якості з можливістю одночасного переміщення предметів у кадрі під водою з високою точністю та фіксації параметрів води, при яких проводилась зйомка при вартості, яка не перевищує вартості менш функціональних конкурентів.
	4. Військові застосування	Збільшення ефективності виявлення та знешкодження вибухових предметів під водою за рахунок підвищення якості керування підводним роботом, підвищення маневреності та можливості одночасного оптичного та гідроакустичного спостереження за вибуховим предметом.
	5. Пошукові та рятувальні операції	Пришвидшення, здешевлення та підвищення безпеки і ефективності пошукових операцій за рахунок: використання кількох підводних роботів замість водолазів; швидкого охоплення великих територій пошуку, завдяки одночасному використанню кількох роботів, які координують свої дії між собою; одночасного використання як гідроакустичних, так і оптичних засобів пошуку.

Таким чином визначено зміст ідеї, ряд переваг та можливі базові потенційні ринки.

Сильні (S), слабкі (W) та нейтральні (N) сторони ідеї стартап-проекту виділено в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Geneinno Titan 150M	Remus-100	Gladius Mini			
1.	Вартість	1500 у.о.	3000 у.о.	Працює в основному на військовий ринок	2000 у.о.			+
2.	Автономність	>10 годин	4 години	12 годин	2 години		+	
3.	Використання сонячної енергії	Є	Відсутнє	Відсутнє	Відсутнє			+
4.	Функціональність	Дуже широка	Вузька	Широка	Дуже вузька			+
5.	Швидкість	3 м/с	2 м/с	2,6м/с	2 м/с			+
6.	Маневреність, точність	Висока	Середня	Низька	Середня			+
7.	Легкість транспортування, зберігання	Легко (5кг)	Легко (4,4кг)	Відносно важко (32кг)	Легко (2,5кг)		+	
8.	Можливість координування дій з іншими підводними роботами	Є	Відсутня	Відсутня	Відсутня			+
9.	Можливість централізованого керування та збору даних із кількох підводних роботів	Є	Відсутня	Відсутня	Відсутня			+

Продовження таблиці 8.2

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
10.	Функціональна перевантаженість при застосуванні для вузькоспеціалізованих завдань певної галузі	Дуже висока	Майже відсутня	Середня	Зовсім відсутня	+		

У результаті досліджень було виділено трьох основних конкурентів, а також сильні, слабкі та нейтральні сторони стартап-проекту. До сильних сторін можна віднести порівняно низьку вартість при великій функціональності, можливість використання сонячної енергії для роботи робота, його швидкість, маневреність, точність, а також можливість централізованого керування та збору даних із багатьох підводних роботів і можливість координування дій з іншими підводними роботами. До нейтральних сторін віднесено розміри та масу робота, легкість його транспортування чи зберігання та час автономної роботи. Слабкою стороною проекту є його функціональна перевантаженість за умови використання для вузькоспеціалізованих завдань певної галузі.

Таким чином, наявні переваги стартап-проекту повинні забезпечити його гарну конкурентоспроможність.

8.2 Технологічний аудит ідеї стартап-проекту

У таблиці 8.3 проаналізовано наявність та доступність технологій, необхідних для реалізації ідеї стартап-проекту.

Таблиця 8.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.		Розроблення структурної та функціональної схеми системи	Наявна	Доступна
2.		Розроблення математичної моделі підводного робота	Наявна	Доступна
3.		Метод синтезу адаптивних систем керування, здатних забезпечити потрібну якість перехідних процесів	Розроблено у даній магістерській дисертації	Доступна
4.		Комп'ютерне моделювання адаптивної системи керування підводним роботом	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Синтез адаптивної системи керування підводним роботом розробленим методом.				

Таким чином, всі технології, необхідні для реалізації проекту, доступні. Для реалізації проекту обрано розроблений у даній магістерській дисертації метод синтезу адаптивної системи керування підводним роботом, оскільки, серед усіх доступних методів лише він дозволяє забезпечити необхідну якість адаптації до змінних параметрів підводного робота.

8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Характеристика ринку стартап-проекту наведена в таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	3000
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	Наявність конкуренції в усіх сферах застосування, необхідність метрологічної сертифікації для екологічних досліджень
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Для військових та екологічних застосувань необхідна сертифікація
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	30

Ринок стартап-проекту є привабливим для входження завдяки гарній рентабельності та відносно незначній конкуренції в Україні.

У таблиці 8.5 наведено потенційних клієнтів стартап-проекту.

Таблиця 8.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Підводний ринок	Військові структури	Потребують підвищення безпеки при виявленні та знешкодженні вибухових предметів, а також підвищення ефективності цього процесу.	До продукції: сертифікованість, висока швидкість, маневреність та керованість, автономність та адаптивність до зміни параметрів, висока точність та керованість маніпулятора. До компанії-постачальника: надійність, сертифікованість.

Продовження таблиці 8.5

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
2.		Екологічні компанії	Потребують охоплення більших територій для проведення екологічних досліджень; здешевлення, пришвидшення виконання високоточних екологічних прогнозів.	До продукції: метрологічна сертифікованість, висока автономність та адаптивність до зміни параметрів, висока точність вимірювань, можливість централізованого збору даних із багатьох роботів та координування їх дій між собою. До компанії- постачальника: надійність, стабільність, сертифікованість.
3.		Компанії, що займаються картографією	Потребують спрощення, здешевлення та пришвидшення високоякісного картографування дна.	До продукції: сертифікованість, висока автономність та адаптивність до зміни параметрів, висока якість гідроакустичних знімків, можливість централізованого збору даних із багатьох роботів та координування їх дій між собою. До компанії- постачальника: надійність, стабільність, сертифікованість.

Продовження таблиці 8.5

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
4.		Пошукові та рятувальні служби	Потребують збільшення ефективності та пришвидшення пошукових і рятувальних операцій.	<p>До продукції: висока точність, маневреність; надійність; висока адаптивність до зміни параметрів; швидкість; низька вартість; висока автономність; висока якість фото та гідроакустичної зйомки; можливість централізованого збору даних із багатьох роботів та координування їх дій між собою.</p> <p>До компанії-постачальника: надійність, сертифікованість, наявність якісної технічної підтримки.</p>
5.		Широке коло аматорів	Бажають збільшення доступності та здешевлення підводної зйомки професійної якості.	<p>До продукції: висока якість підводної зйомки, низька ціна.</p> <p>До компанії-постачальника: надійність, наявність гарантійного обслуговування та якісної технічної підтримки.</p>

Таким чином, визначено основні цільові сегменти ринку: військові та силові структури, компанії, що займаються екологією чи картографією, пошукові та рятувальні служби, широке коло аматорів. Також сформовано основні вимоги до продукту та компанії постачальника.

Фактори загроз, які перешкоджають ринковому впровадженню стартап-проекту наведено в таблиці 8.6.

Таблиця 8.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Крадіжка та модифікування конкурентом ідеї проекту	Через функціональну перевантаженість робота для вузьких сфер його застосування та легкість його модифікації існує велика загроза копіювання конкурентом ідеї проекту, виключення із робота кількох підсистем та випуск на ринок на багато дешевшого вузькоспеціалізованого аналога.	Випуск кількох моделей підводних роботів: дорожча та багатофункціональна і кілька дешевих вузькоспеціалізованих, що відрізняються відсутністю кількох підсистем. Патентування розробленого методу синтезу адаптивних систем керування.
2.	Зріст конкуренції	Поява інших конкурентоспроможних компаній	Підвищення якості та покращення технічних характеристик підводного робота. Зменшення ціни підводного робота за рахунок нарощування обсягів виробництва та вдосконаленню його конструкції.
3.	Зміна стандартів	Зміна метрологічних, військових, екологічних чи технічних стандартів.	Повторна сертифікація підводного робота, або повний перехід лише на ринок для широкого кола аматорів.

Аналіз факторів загроз показує, що найбільшою загрозою для ринкового впровадження стартап-проекту можуть стати його ж переваги: велика функціональність, що є функціональною перевагою для вузьких сфер застосування та легкість модифікації підводного робота, що породжує велику загрозу копіювання конкурентом ідеї проекту, виключення із роботи кількох підсистем та випуск на ринок на багато дешевшого вузькоспеціалізованого аналога. Але були продумані заходи для усунення впливу всіх розглянутих факторів загроз.

Як зазначалось у розділі 1, існує дуже багато сфер застосування підводних роботів, сфери їх застосування постійно розширюються. У таблиці 8.7 розглянуто фактори можливостей стартап-проекту.

Таблиця 8.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Поява нових сфер застосування підводного робота	Поява нових сфер застосування підводного робота: виникнення необхідності у підводних роботах в інших компаніях, які раніше не мали такої потреби; виникнення нових компаній у нових галузях.	Удосконалення підводного робота для кращої пристосованості до роботи у нових сферах застосування чи випуск вузькоспеціалізованих моделей роботів для нової сфери застосування.
2.	Зростання попиту	Збільшення обсягів закупок підводних роботів наявними компаніями та вихід на ринок нових компаній, яким потрібні саме такі підводні роботи.	Збільшення обсягів виробництва підводних роботів, зменшення ціни, удосконалення їх технічних характеристик.
3.	Здешевлення комплектуючих для виготовлення підводного робота	Зменшення витрат на виробництво підводних роботів.	Зменшення ціни, розроблення нових моделей роботів, удосконалення технічних характеристик існуючих підводних роботів.

З таблиць 8.6 та 8.7 видно, що фактори загроз не перевищують фактори можливостей, більше того, ймовірність виникнення деяких можливостей значно більша, ніж загроз.

Аналіз пропозиції та загальні риси конкуренції на ринку наведено в таблиці 8.8.

Таблиця 8.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Тип конкуренції: - чиста	На ринку нема однієї або кількох домінуючих компаній: жодна не може сильно впливати на ситуацію на всьому ринку.	Виготовлення досконалішого, дешевшого продукту.
2. За рівнем конкурентної боротьби: - міжнародний	Конкуренція на міжнародному рівні.	Сильні українські конкуренти відсутні. Можливість виходу на міжнародний ринок.
3. За галузевою ознакою: - міжгалузева	Підводні роботи можуть застосовуватись у різних галузях і задовольняти різні потреби.	Виготовлення багатофункціонального підводного робота, що дешевий за вузькоспеціалізованих аналогів за рахунок використання розробленого методу синтезу адаптивних систем керування.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Товари для задоволення певної потреби відрізняються характеристиками.	Виготовлення багатофункціонального підводного робота, покращення характеристик робота.
5. За характером конкурентних переваг: - цінова	У більшості сфер застосування ціна є головною конкурентною перевагою.	Зниження цини на готовий продукт, виготовлення вузькоспеціалізованих дешевих моделей.

Продовження таблиці 8.8

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
6. За інтенсивністю: - не марочна	Немає значення яка компанія виготовила продукт.	Покращення якості, характеристик та зниження ціни продукту.

Виконано ступеневий аналіз конкуренції на ринку. З'ясовано, що конкуренція на українському ринку підводних роботів відносно низька і її становлять іноземні компанії, для яких український ринок не дуже важливий. Тому доцільно спершу виводити продукт на внутрішній український ринок, а потім існує можливість виходу і на міжнародний ринок, оскільки, даний підводний робот конкурентоспроможний і на міжнародному ринку.

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером представлено в таблиці 8.9.

Таблиця 8.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	“Geneinno”, “Gladius”	“Remus”	“Geneinno”, “Gladius”	Військові та силові структури, компанії, що займаються екологічними дослідженнями та картографуванням, рятувальні та пошукові служби, широке коло аматорів.	Товари-замінники відсутні.

Продовження таблиці 8.9

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Висновки	Є незначна конкуренція	Працює на військову галузь деяких країн. Існує ймовірність виходу в інші галузі та на український ринок.	Постачальники не диктують умови роботи на ринку.	Усі компанії, крім приватних покупців диктують деякі умови роботи на ринку: відповідність стандартам та наявність відповідних сертифікатів.	Товари-замінники відсутні. Дослідження показали, що синтез більш якісної адаптивної системи керування підводним роботом відомими методами неможливий.

За результатами аналізу таблиці 8.9, робота на ринку можлива. Проект має сильні сторони: ціна і функціональність, необхідні для успішної роботи на ринку.

У таблиці 8.10 наведено обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 8.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Вартість	У 1,5-2 рази дешевше, ніж вузькоспеціалізовані аналоги.
2.	Можливість централізованого керування та збору даних із кількох підводних роботів та координування їх дій між собою.	Ця можливість необхідна на сучасному етапі екологічних досліджень. У конкурентів відсутня.
3.	Широка функціональність	Дозволяє легко змінити ринок збуту продукції у випадку повного займання одного з ринків конкурентом.

Продовження таблиці 8.10

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
4.	Легкість модифікування та розроблення нових моделей.	Дозволяє швидко пристосуватись до змінних умов ринку.
5.	Адаптивність системи керування до змінних параметрів підводного робота	Підводний робот завжди працює однаково і незалежно від умов експлуатації чи змін внесених в його конструкцію.

У таблиці 8.10 визначено основні фактори конкурентоспроможності, необхідні для подальшого аналізу.

У таблиці 8.11 наведено порівняльний аналіз сильних та слабких сторін стартап проекту.

Таблиця 8.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг мого проекту у порівнянні з товарами-конкурентами						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Вартість	20							+
2.	Можливість централізованого керування та збору даних із кількох підводних роботів та координування їх дій між собою.	20							+
3.	Широка функціональність	18						+	
4.	Легкість модифікування та розроблення нових моделей.	18						+	
5.	Висока якість адаптації системи керування до змінних параметрів підводного робота	18						+	

У таблиці 8.12 наведено SWOT-аналіз стартап-проекту (аналіз сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities)).

Таблиця 8.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> – вартість; – використання сонячної енергії; – функціональність; – швидкість; – маневреність, точність; – можливість координування дій з іншими підводними роботами; – можливість централізованого керування та збору даних із кількох підводних роботів. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> – функціональна перевантаженість при застосуванні для вузькоспеціалізованих завдань певної галузі.
<p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> – поява нових сфер застосування підводного робота; – зростання попиту; – здешевлення комплектуючих для виготовлення підводного робота. 	<p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> – крадіжка та модифікування конкурентом ідеї проекту; – зріст конкуренції; – зміна стандартів.

На основі SWOT-аналізу розроблено альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту, що наведені в таблиці 8.13.

Таблиця 8.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс ходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Розроблення кількох моделей підводних роботів: дорожча та багатофункціональна і кілька дешевих вузькоспеціалізованих, що відрізняються відсутністю кількох підсистем.	Висока	1 тиждень
2.	Підвищення якості та покращення технічних характеристик підводного робота.	Середня	6 місяців

Продовження таблиці 8.13

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
3.	Зменшення ціни підводного робота за рахунок нарощування обсягів виробництва та вдосконаленню його конструкції.	Низька	1 рік

У результаті проведеного аналізу обрано альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту: розроблення кількох моделей підводних роботів з різною функціональністю.

8.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Стратегії охоплення ринку, а саме: опис цільових груп потенційних споживачів, визначено у таблиці 8.14.

Таблиця 8.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Військові структури	Середня	Високий	Висока	Висока складність
2.	Екологічні компанії	Висока	Високий	Низька	Відносно низька складність
3.	Компанії, що займаються картографією	Середня	Середній	Низька	Середня складність

Продовження таблиці 8.14

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
4.	Пошукові та рятувальні служби	Висока	Середній	Відносно низька	Середня складність
5.	Широке коло аматорів та кіностудії	Висока	Середній	Середня	Відносно низька складність
Обрано наступні цільові групи: <ul style="list-style-type: none"> – екологічні компанії; – широке коло аматорів та кіностудії; – пошукові та рятувальні служби; – компанії, що займаються картографією. 					

У результаті аналізу 4 цільові групи споживачів. Обрано стратегію диференційованого маркетингу, оскільки, планується робота з кількома сегментами, а в подальшому можливий перехід на масовий маркетинг та роботу з усім ринком.

Базову стратегію розвитку для роботи в обраних сегментах сформовано в таблиці 8.15.

Таблиця 8.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Розроблення кількох моделей підводних роботів з різною функціональністю	Диференційований маркетинг	Відповідність потребам користувачів усіх обраних галузей; значно нижча, ніж у конкурентів ціна; недопущення розвитку конкурентів на базі ідеї даного проекту.	Стратегія диференціації

У результаті аналізу базовою стратегією розвитку було обрано стратегію диференціації.

У таблиці 8.16 визначено базову стратегію конкурентної поведінки.

Таблиця 8.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	У плані високої функціональності та універсальності, завдяки розробленому методу синтезу адаптивних систем керування, проект є «першопрохідцем» на ринку	Будуть шукатись нові споживачі, можливе захоплення всього ринку підводних роботів.	Не буде. Буде використовуватись розроблена адаптивна система керування підводним роботом.	Стратегія виклику лідера

У якості стратегії конкурентної поведінки обрано стратегію виклику лідера, оскільки, проект має ряд важливих конкурентних переваг, а український ринок для прямого конкурента не є важливим, тому швидше за все він не докладатиме великих зусиль у боротьбі за нього.

Стратегію позиціонування визначено в таблиці 8.17.

У таблиці 8.17 сформовано комплексну стратегію позиціонування стартап-проекту та вибрано ключові асоціації для його позиціонування на ринку.

Таблиця 8.17 – Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Низька вартість	Стратегія диференціації	Вартість у 1,5-2 рази нижча, ніж у конкурентів	Низька вартість, висока функціональність, якість
2.	Висока якість фотозйомки	Стратегія диференціації	Професійна якість підводної зйомки завдяки наявності високоякісної камери та системи стабілізації зображення	Професійна якість, чіткість, плавність
3.	Висока якість гідроакустичної зйомки	Стратегія диференціації	Швидке та якісне картографування великих територій	Швидка, якісна картографія
4.	Автономність та використання сонячної енергії	Стратегія диференціації	Автономність на рівні конкурентів, або перевищує їх, використання альтернативних джерел енергії	Висока автономність, сонячна енергія
5.	Маневреність, точність	Стратегія диференціації	Висока маневреність та точність завдяки розробленому методу адаптації	Маневреність, точність, швидкість
6.	Можливість централізованого керування та збору даних із кількох підводних роботів та координування їх дій між собою	Стратегія диференціації	Швидке охоплення великих територій для моніторингу	ІоТ, всеосяжність, швидкість

8.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

У таблиці 8.18 визначено ключові переваги концепції потенційного товару.

Таблиця 8.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Низька вартість	Значно дешевший товар з кращими характеристиками	Значно дешевший товар з кращими характеристиками.
2.	Можливість централізованого керування та збору даних із кількох підводних робіт та координування їх дій між собою.	Охоплення більших територій для проведення екологічних досліджень; здешевлення, пришвидшення виконання високоточних екологічних прогнозів.	У конкурентів така функціональність відсутня.
3.	Висока якість гідроакустичних знімків	Спрощення, здешевлення та пришвидшення високоякісного картографування дна.	У товарів конкурентів нема можливості швидкого охоплення великих територій картографування через відсутність можливості взаємного координування дій кількох підводних робіт.
4.	Висока якість підводної фотозйомки	Збільшення доступності та здешевлення підводної зйомки професійної якості.	Товар прямого конкурента, призначений лише для аматорської підводної зйомки має удвічі більшу ціну.

У результаті формування таблиці 8.17 багато переваг, які даний продукт може надати споживачу.

У таблиці 8.19 розробляється трирівнева маркетингова модель товару.

Таблиця 8.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Багатофункціональний підводний робот, здатний до роботом у автономному та телекерованому режимах з виконанням функцій переміщення, моніторингу екологічного стану води, фото та відео зйомки, обстеження рельєфу дна		
	Властивості/характеристики	М/Н м	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Вартість	М	Вр
	2. Швидкість	М	Тх
	3. Час автономної роботи	М	Тх
	4. Глибина занурення	М	Тх
	5. Точність позиціонування маніпулятора	М	Тх
	6. Точність вимірювань	М	Тх
	Якість: ISO, ДСТУ		
Пакування: картонна коробка із зображенням підводного робота, його технічними характеристиками, базовими вказівками щодо безпечного розпакування та експлуатації.			
Марка: «Багатофункціональний підводний робот»			
	До продажу: реклама.		
	Після продажу: технічна підтримка, гарантійне обслуговування.		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: патенти.			

У результаті заповнення таблиці 8.19 отримано маркетингову модель товару та визначено, що захист від копіювання буде здійснено шляхом патентування.

Визначення меж встановлення ціни товару наведено в таблиці 8.20.

Таблиця 8.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
1.	2000-5000 у.о.	відсутні	>3000 у.о.	700-1500 у.о.

Таким чином, встановлено верхню та нижню межі ціни на товар на рівні 700-1500 у.о., що відповідає затратам на його виготовлення, очікуванням споживачів, та значно менше за ціну у конкурентів.

Формування системи збуту наведено в таблиці 8.21.

Таблиця 8.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Замовлення за договором	Доставка, зберігання	Прямий канал збуту	Прямий канал збуту
2.	Замовлення через сайт виробника	Доставка, зберігання	Прямий канал збуту	Прямий канал збуту

У таблиці 8.21 оптимальним визначено прямий канал збуту.

Концепцію маркетингових комунікацій наведено в таблиці 8.22.

Таблиця 8.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Пошук потрібного товару в усіх можливих інформаційних ресурсах.	Інтернет, спеціалізовані виставки, інші можливі джерела реклами.	Низька ціна, висока функціональність, якість, точність; можливість роботи багатьох роботів у складі єдиної системи із координуванням дій між собою.	Поширення інформації про новий товар та його переваги.	Підкреслення переваг продукту.

У таблиці 8.22 сформовано концепцію маркетингових комунікацій, яка спрямована на залучення нових клієнтів, шляхом донесення до них інформації про новий товар та вигоди від його використання.

Висновки до розділу 8

У результаті проведеного аналізу стартап-проекту визначено:

- а) існує висока ймовірність ринкової комерціалізації проекту (наявний попит, динаміка ринку зростає, достатня рентабельність роботи на ринку);
- б) впровадження проекту перспективне з огляду на відносно низький рівень конкуренції, гарну конкурентоспроможність проекту та наявність 5 груп потенційних клієнтів;
- в) у результаті проведеного аналізу обрано розроблення кількох моделей підводних роботів з різною функціональністю, як альтернативу ринкового впровадження стартап-проекту;
- г) з огляду на проведений аналіз, подальша імплементація проекту є доцільною.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації було розроблено адаптивну систему керування підводним роботом, що дозволила досягти поставленої мети – підвищення ефективності функціонування підводного робота.

Розроблена адаптивна система керує підводним роботом масою 5кг, який максимальну швидкість маршового руху 3м/с, максимальна глибина занурення – 100м.

У магістерській дисертації розроблені: структурна та функціональна схема адаптивної системи, математична модель динаміки підводного робота, експериментальні моделі дослідження процесів адаптації зміни коефіцієнта підсилення та сталої часу до еталонної моделі, експериментальні моделі визначення адекватності параметрів маршових двигунів паспортним даним.

Проведені дослідження на розроблених моделях складових та адаптивної системи керування в цілому показали: по-перше адекватність розроблених моделей реальним технічним пристроям. Отримані результати моделювання повністю збігаються з паспортними даними технічних пристроїв; по-друге запропонований метод синтезу адаптивної системи з використанням функцій Ляпунова та вбудованим ПД-регулятором дозволив використовувати для моделювання спрощену математичну модель, що має велику цінність в інженерних дослідженнях; по-третє як показали проведені експериментальні дослідження, помилка адаптації до зміни коефіцієнта підсилення та сталої часу складає у середньому 0,82%.

За результатами проведених досліджень була опублікована стаття:

Репнікова Н. Б. Розвиток можливостей синтезу адаптивних систем керування на базі функцій Ляпунова / Н.Б. Репнікова, Ю.М. Бердник // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2019. — №8. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-8-4986>.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др.; под общ. ред. М.Д. Агеева; [отв. ред. Л.В. Киселев]; Ин-т проблем морских технологий. —М.: Наука. 2005.- 398 с. - ISBN 5-02-033526-6.
2. Adegboye M. A. Recent advances in pipeline monitoring and oil leakage detection technologies: principles and approaches / Adegboye, M. A., Fung, W. K., & Karnik, A. // *Sensors*, 19(11), 2548, 2019. – pp.2-36.
3. Shukla A. Application of robotics in offshore oil and gas industry—A review Part II. / A. Shukla, A., H. Karki // *Robotics and Autonomous Systems*, 75, 2016. – pp.508-524.
4. Vasilijević A. Coordinated Navigation of Surface and Underwater Marine Robotic Vehicles for Ocean Sampling and Environmental Monitoring / A. Vasilijević, Đ. Nađ, F. Mandić, N. Mišković and Z. Vukić // *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22(3), 2017. – pp. 1174-1184. doi: 10.1109/TMECH.2017.2684423
5. Jones, Kevin D., and Vladimir N. Dobrokhodov. "Hybrid mobile buoy for persistent surface and underwater exploration." U.S. Patent No. 9,321,529. 26 Apr. 2016.
6. Jones, Kevin D., and Vladimir N. Dobrokhodov. "Multirotor mobile buoy for persistent surface and underwater exploration." U.S. Patent No. 9,457,900. 4 Oct. 2016.
7. Katzschmann, Robert K. et al. "Exploration of Underwater Life with an Acoustically Controlled Soft Robotic Fish." *Science Robotics* 3, 16 (March 2018): eaar3449
8. Dayoub, F., Dunbabin, M., & Corke, P. (2015, September). Robotic detection and tracking of crown-of-thorns starfish. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 1921-1928). IEEE.
9. Родін, І. О. Стан та напрямки розвитку підводних апаратів-міношукачів військово-морських сил провідних країн світу / І. О. Родін, Є. Е. Померанцев // *Електронний вісник НУК*, 2010 - №3.

10. Williams, D. P. On optimal AUV track-spacing for underwater mine detection. // In 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010. – pp. 4755-4762.
11. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Микроробототехника - Электроника. Наука, технология, бизнес. - 2009. - №7. - с.62-69.
12. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Микроробототехника - Электроника. Наука, технология, бизнес. - 2009. - №8. - с.88-93.
13. Titan, 1st professional diving drone that can equip with robotic arm. [Електронний ресурс] : Офіційний сайт виробника підводного робота – Назва з екрана. Доступ : <https://geneinno.us/products/titan-diving-drone>
14. Geneinno T1 user manual. V1.1.0 2019.06 [Електронний ресурс] : технічна документація підводного робота – Назва з екрана. Доступ : <https://www.geneinno.com/titan-en.pdf>
15. MIT News. Soft robotic fish swims alongside real ones in coral reefs. [Електронний ресурс] : Офіційний сайт науково-дослідної установи – розробника підводного робота – Назва з екрана. Доступ : <http://news.mit.edu/2018/soft-robotic-fish-swims-alongside-real-ones-coral-reefs-0321>
16. Hydroid, L. L. C. REMUS 100 Brochure. // Hydroid, LLC, Pocasset, MA, 2017.
17. New Generation REMUS 100 for Commercial Applications. The Perfect Balance of Design & Technology. [Електронний ресурс] : Офіційний сайт виробника підводного робота – Назва з екрана. Доступ : <https://www.hydroid.com/new-generation-remus-100-commercial-applications>
18. Autonomous underwater vehicle, REMUS 100. [Електронний ресурс] : Офіційний сайт виробника підводного робота – Назва з екрана. Доступ : <https://www.kongsberg.com/maritime/products/marine-robotics/autonomous-underwater-vehicles/AUV-remus-100/#technicalInformation>

19. Филаретов В.Т. Устройства и системы управления подводных роботов / В.Ф. Филаретов, А.В. Лебедев, Д.А. Юхимец : [отв. ред. Ю.Н. Кульчин]: Ин-т автоматизации и процессов управления ДВО РАН. —М. : Наука, 2005. — 270 с.- ISBN 5-02-033944-X (в пер.)
20. Репнікова Н.Б. Теорія автоматичного керування: класика і сучасність: підруч. / Н.Б. Репнікова. — К. : НТУУ «КПІ», 2011. — 328 с.
21. Crouzet DC motor 82740402 datasheet. [Електронний ресурс] : Технічна документація двигуна. — Назва з екрана. Доступ : <http://media.crouzet.com/datasheets/english/dc-motors-dc-direct-drive-brushed-motors-36-mm-30-watts-30-w-Part%20number-82740402.pdf>
22. Чураков Е.П. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов / Е.П. Чураков. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 256 с.
23. Бейнарович, В. А. Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью/В.А. Бейнарович // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники /№1/21, 2010.
24. Есаков В.А. Синтез адаптивных систем методом функций Ляпунова / В.А. Есаков, В.Г. Дудко // Проблемы Науки. 2018. №12 (132).
25. Репнікова Н.Б. Алгоритм синтезу самоналагоджувальних систем управління з моделлю/ Н.Б. Репнікова, А.В. Писаренко, О.В. Лобода, А.М. Хомій // Системи обробки інформації/ Вип.2 2009, с. 94-97.
26. DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. Modern control systems. Pearson, 2011.
27. Репнікова Н. Б. Розвиток можливостей синтезу адаптивних систем керування на базі функцій Ляпунова / Н.Б. Репнікова, Ю.М. Бердник // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", 2019. — №8, 2т. — С. 61-66. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2019-8-4986>.

ДОДАТОК А

Перелік опублікованих матеріалів

**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ
«ІНТЕРНАУКА»**

**INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL
«INTERNAUKA»**

**МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ИНТЕРНАУКА»**

*Свідоцтво
про державну реєстрацію
друкованого засобу масової інформації
КВ № 22444-12344ПР*

Збірник наукових праць

№ 8 (70)

2 том

Київ 2019

ББК 1
УДК 001
М-43



Повний бібліографічний опис всіх статей Міжнародного наукового журналу «Інтернаука» представлено в: **Polish Scholarly Bibliography; ResearchBib; Turkish Education Index; Наукова періодика України.**

Журнал зареєстровано в міжнародних каталогах наукових видань та наукометричних базах даних: Ulrichsweb Global Serials Directory; Google Scholar; Open Academic Journals Index; Research-Bib; Turkish Education Index; Polish Scholarly Bibliography; Electronic Journals Library; Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky; InfoBase Index; Open J-Gate; Academic keys; Наукова періодика України; Bielefeld Academic Search Engine (BASE); CrossRef.

В журналі опубліковані наукові статті з актуальних проблем сучасної науки.

Матеріали публікуються мовою оригіналу в авторській редакції.

Редакція не завжди поділяє думки і погляди автора. Відповідальність за достовірність фактів, імен, географічних назв, цитат, цифр та інших відомостей несуть автори публікацій.

У відповідності із Законом України «Про авторське право і суміжні права», при використанні наукових ідей і матеріалів цієї збірки, посилання на авторів та видання є обов'язковими.

Редакція:

Головний редактор: **Коваленко Дмитро Іванович** — кандидат економічних наук, доцент (Київ, Україна)

Випускаючий редактор: **Золковер Андрій Олександрович** — кандидат економічних наук, доцент (Київ, Україна)

Секретар: **Колодіч Юлія Ігорівна**

Редакційна колегія:

Голова редакційної колегії: **Камінська Тетяна Григорівна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Заступник голови редакційної колегії: **Курило Володимир Іванович** — доктор юридичних наук, професор, заслужений юрист України (Київ, Україна)

Заступник голови редакційної колегії: **Тарасенко Ірина Олексіївна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Розділ «Економічні науки»:

Член редакційної колегії: **Алієв Шафа Тифліс огли** — доктор економічних наук, професор, член Ради — науковий секретар Експертної ради з економічних наук Вищої Атестаційної Комісії при Президенті Азербайджанської Республіки (Сумгаїт, Азербайджанська Республіка)

Член редакційної колегії: **Баланюк Іван Федорович** — доктор економічних наук, професор (Івано-Франківськ, Україна)

Член редакційної колегії: **Бардаш Сергій Володимирович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Бондар Микола Іванович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Вдовенко Наталія Михайлівна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Гоблик Володимир Васильович** — доктор економічних наук, кандидат філософських наук, професор, Заслужений економіст України (Мукачеве, Україна)

Член редакційної колегії: **Гринько Алла Павлівна** — доктор економічних наук, професор (Харків, Україна)

Член редакційної колегії: **Гуцаленко Любов Василівна** — доктор економічних наук, професор (Вінниця, Україна)

Член редакційної колегії: **Дерій Василь Антонович** — доктор економічних наук, професор (Тернопіль, Україна)

Член редакційної колегії: **Денисенко Микола Павлович** — доктор економічних наук, професор, член-кореспондент Міжнародної академії інвестицій і економіки будівництва, академік Академії будівництва України та Української технологічної академії (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Дмитренко Ірина Миколаївна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Драган Олена Іванівна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Еміне Лейла Кият** — доктор економічних наук, доцент (Туреччина)

Член редакційної колегії: **Сфіменко Надія Анатоліївна** — доктор економічних наук, професор (Черкаси, Україна)

Член редакційної колегії: **Заруцька Олена Павлівна** — доктор економічних наук, професор (Дніпро, Україна)

Член редакційної колегії: **Захарін Сергій Володимирович** — доктор економічних наук, старший науковий співробітник, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Зеліско Інна Михайлівна** — доктор економічних наук, професор, академік Академії економічних наук України (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Зось-Кіор Микола Валерійович** — доктор економічних наук, професор (Полтава, Україна)

Член редакційної колегії: **Ільчук Павло Григорович** — доктор економічних наук, доцент (Львів, Україна)

Член редакційної колегії: **Клочан В'ячеслав Васильович** — доктор економічних наук, професор (Миколаїв, Україна)

Член редакційної колегії: **Копилюк Оксана Іванівна** — доктор економічних наук, професор (Львів, Україна)

Член редакційної колегії: **Кравченко Ольга Олексіївна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Курило Людмила Ізидорівна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Кухленко Олег Васильович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Лойко Валерія Вікторівна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Лоханова Наталя Олексіївна** — доктор економічних наук, професор (Львів, Україна)

Член редакційної колегії: **Малік Микола Йосипович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Мігус Ірина Петрівна** — доктор економічних наук, професор (Черкаси, Україна)

Член редакційної колегії: **Мухсінова Лейла Хасанівна** — доктор економічних наук, доцент (Оренбург, Російська Федерація)

Член редакційної колегії: **Ніценко Віталій Сергійович** — доктор економічних наук, доцент (Одеса, Україна)

Член редакційної колегії: **Олійник Олександр Васильович** — доктор економічних наук, професор (Харків, Україна)

Член редакційної колегії: **Осмятченко Володимир Олександрович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Охріменко Ігор Віталійович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Паска Ігор Миколайович** — доктор економічних наук, професор (Біла Церква, Україна)

Член редакційної колегії: **Разумова Катерина Миколаївна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Рамський Андрій Юрійович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Селіверстова Людмила Сергіївна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Скрипник Маргарита Іванівна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Смолін Ігор Валентинович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Сунцова Олеся Олександрівна** — доктор економічних наук, професор, академік Академії економічних наук України (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Танклевська Наталія Станіславівна** — доктор економічних наук, професор (Херсон, Україна)

Член редакційної колегії: **Токар Володимир Володимирович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Тульчинська Світлана Олександрівна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Хахонова Наталія Миколаївна** — доктор економічних наук, професор (Ростов-на-Дону, Російська Федерація)

Член редакційної колегії: **Чижевська Людмила Віталіївна** — доктор економічних наук, професор (Житомир, Україна)

Член редакційної колегії: **Чубукова Ольга Юріївна** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Шевчук Ярослав Васильович** — доктор економічних наук, старший науковий співробітник, доцент (Нововолинськ, Волинська обл., Україна)

Член редакційної колегії: **Шинкарук Лідія Василівна** — доктор економічних наук, професор, член-кореспондент НАН України (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Шпак Валентин Аркадійович** — доктор економічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Белялов Талат Енверович** — кандидат економічних наук, доцент (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Скриньковський Руслан Миколайович** — кандидат економічних наук, член-кореспондент Української академії наук (Львів, Україна)

Член редакційної колегії: **Peter Bielik** — Dr. hab. (Словацька Республіка)

Член редакційної колегії: **Eva Fichtnerová** — University of South Bohemia in České Budějovice (Чеська Республіка)

Член редакційної колегії: **József Káposzta** — Dr. hab. (Угорщина)

Член редакційної колегії: **Henrietta Nagy** — Dr. hab. (Угорщина)

Член редакційної колегії: **Venelin Terziev** — Professor Dipl.Eng., PhD, доктор наук з національної безпеки, доктор економічних наук, член-кореспондент Російської академії природної історії (Русе, Болгарія)

Член редакційної колегії: **Anna Törő-Dunay** — Dr. hab. (Угорщина)

Член редакційної колегії: **Mirosław Wasilewski** — Dr. hab., Associate professor WULS-SGGW (Польща)

Член редакційної колегії: **Natalia Wasilewska** — Doctor of Economic Sciences, professor UJK (Польща)

Розділ «Технічні науки»:

Член редакційної колегії: **Беліков Анатолій Серафимович** — доктор технічних наук, професор (Дніпро, Україна)

Член редакційної колегії: **Луценко Ігор Анатолійович** — доктор технічних наук, професор (Кременчук, Україна)

Член редакційної колегії: **Мельник Вікторія Миколаївна** — доктор технічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Наумов Володимир Аркадійович** — доктор технічних наук, професор (Калінінград, Російська Федерація)

Член редакційної колегії: **Румянцев Анатолій Олександрович** — доктор технічних наук, професор (Краматорськ, Україна)

Член редакційної колегії: **Сергейчук Олег Васильович** — доктор технічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Чабан Віталій Васильович** — доктор технічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Аль-Абабнех Хасан Алі Касем** — кандидат технічних наук (Амман, Йорданія)

Член редакційної колегії: **Артюхов Артем Євгенович** — кандидат технічних наук, доцент (Суми, Україна)

Член редакційної колегії: **Баширбейлі Адалат Ісмаїл** — кандидат технічних наук, головний науковий спеціаліст (Баку, Азербайджанська Республіка)

Член редакційної колегії: **Коньков Георгій Ігорович** — кандидат технічних наук, професор (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Кузьмін Олег Володимирович** — кандидат технічних наук, доцент (Київ, Україна)

Член редакційної колегії: **Саньков Петро Миколайович** — кандидат технічних наук, доцент (Дніпро, Україна)

№ 8 (70) 2 т.**2019**
травеньМІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ «ІНТЕРНАУКА»
INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL «INTERNAUKA»
МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «ИНТЕРНАУКА»**ЗМІСТ**
CONTENTS
СОДЕРЖАНИЕ**ЕКОНОМІЧНІ НАУКИ**

- Горбатенко Олена Анатоліївна**
ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ
НА ПІДПРИЄМСТВАХ УКРАЇНИ..... 9
- Турсунов Алишер Мухамадназирович, Саидкаримова Матлюба Ишановна**
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ УЗБЕКИСТАНА..... 12
- Хачатрян Валентина Валентинівна, Ступак Ірина Ігорівна**
ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МІЖНАРОДНОЇ МІГРАЦІЇ РОБОВОЇ СИЛИ В УКРАЇНІ 15

ТЕХНІЧНІ НАУКИ

- Бабенко Віталій Олегович**
СИСТЕМА АНАЛІЗУ РИЗИКІВ ПІСЛЯ ХІРУРГІЧНОГО ЛІКУВАННЯ У РАНЬОМУ
ПІСЛЯОПЕРАЦІЙНОМУ ПЕРІОДІ 18
- Вовк Олексій Вікторович, Компанієць Олег Миколайович, Шмаков Віталій Валерійович,
Гриценко Павло Миколайович, Литвинчук Дмитро Валерійович**
СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ФОРМУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБРИСУ ПЕРСПЕКТИВНИХ
ЗРАЗКІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ НА ДОПРОЕКТНИХ ЕТАПАХ 23
- Долінський Анатолій Андрійович, Коник Аліна Василівна,
Радченко Наталія Леонідівна, Целень Богдан Ярославович**
СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИМИ УСТАНОВКАМИ
І ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ..... 28
- Іщенко Тетяна Іванівна, Дочинець Інга Вікторівна, Скрибченко Анастасія Вікторівна**
ЗБАГАЧЕННЯ БОРОШНЯНИХ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБІВ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ
ІНГРЕДІЄНТАМИ 36
- Котляр Ілля Сергійович, Гриша Олена Василівна**
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ГАРМОНІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ОСОБИСТОСТІ КЕРІВНИКА
КОМПАНІЇ 40
- Люта Наталія Вікторівна, Лісафін Володимир Петрович**
МЕХАНІЗМ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛІВ НА РЕОЛОГІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ НАФТИ..... 45
- Марчевський Віктор Миколайович, Новохат Олег Анатолійович, Маргарян Артем Арманович**
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЦЕОЛІТУ 49

Несевря Павел Иванович, Наумов Владислав Александрович, Долотий Марина Анатольевна ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ И ОСОБЕННОСТИ ДЕМОНТАЖА ЗДАНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ЭТАЖНОСТИ.....	55
Репнікова Наталія Борисівна, Бердник Юрій Михайлович РОЗВИТОК МОЖЛИВОСТЕЙ СИНТЕЗУ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ ФУНКЦІЙ ЛЯПУНОВА.....	61
Семінський Олександр Олегович, Онищенко Дмитро Миколайович ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ВКОРОЧЕННЯ ВОЛОКОН ПРИ ОБРОБЦІ ВОДО-ВОЛОКНИСТИХ СУСПЕНЗІЙ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ	67
Шафаренко Микола Васильович, Воробйова Ольга Володимирівна ОЧИСТКА ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД З ВИКОРИСТАННЯМ МЕМБРАННИХ АПАРАТІВ ТА МЕМБРАННОГО БІОРЕАКТОРА	71
Якимів Йосип Васильович, Бортняк Олена Михайлівна ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗДІЛЬНИКІВ У РАЗІ ПОСЛІДОВНОГО ПЕРЕКАЧУВАННЯ РІЗНОСОРТНИХ НАФТ МАГІСТРАЛЬНИМИ ТРУБОПРОВОДАМИ	75

УДК 681.51

Репнікова Наталія Борисівна

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та управління в технічних системах
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Репникова Наталия Борисовна

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры автоматизации и управления в технических системах
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Repnikova Natalya

PhD, Associate Professor
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Бердник Юрій Михайлович

студент
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бердник Юрий Михайлович

студент
Национального технического университета Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Berdnyk Yurii

Student of the
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

DOI: 10.25313/2520-2057-2019-8-4986

РОЗВИТОК МОЖЛИВОСТЕЙ СИНТЕЗУ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА БАЗІ ФУНКЦІЙ ЛЯПУНОВА

РАЗВИТИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИНТЕЗА АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ ЛЯПУНОВА

DEVELOPMENT OF SYNTHESIS OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS BASED ON LYAPUNOV FUNCTIONS

Анотація. Розглядається проблема забезпечення швидкої збіжності процесу в адаптивній системі з еталонною моделлю. Щоб вирішити цю проблему, пропонується використовувати два етапи адаптації. По-перше, адаптація до зміни параметрів об'єкта керування, по-друге – адаптації до характеристик еталонної моделі, за рахунок використання ПІД контролерів. Застосування функцій Ляпунова забезпечує досліджуваній системі стійкий коридор функціонування. Приведені результати моделювання адаптивних систем в широкому діапазоні зміни параметрів об'єкту керування.

Ключові слова: система керування, адаптивна система, функції Ляпунова, ПІД-контролер, еталонна модель.

Аннотация. Рассматривается проблема обеспечения быстрой сходимости процесса в адаптивной системе с эталонной моделью. Для решения проблемы предлагается использование двух этапов адаптации. На первом – адаптация

к изменяющимся параметрам объекта управления, на втором адаптация к характеристикам эталонной модели, путем использования ПИД-контроллеров. Применение функций Ляпунова обеспечивает исследуемой системе устойчивый коридор функционирования. Приведены результаты моделирования адаптивных систем в широком диапазоне изменения параметров объекта управления.

Ключевые слова: система управления, адаптивная система, функции Ляпунова, ПИД-контроллер, эталонная модель.

Summary. It is considered the problem of ensuring the rapid convergence of the process in the adaptive system with the reference model. To solve this problem, it is proposed to use two stages of adaptation. Firstly, the adaptation to the change in object of control parameters, and secondly – adaptation to the characteristics of the reference model, due to usage of PID controllers. The application of Lyapunov functions provide for the investigating system the stable functioning corridor. Are given the results of adaptive systems simulation in a wide range of changes the parameters of the control object.

Key words: control systems, adaptive systems, Lyapunov functions, PID controllers, reference model.

Вступ. Багато сучасних підходів до синтезу систем керування особливу увагу приділяють тому факту, що в процесі експлуатації реальних систем можуть змінюватись параметри і структура об'єкта керування або середовище, в якому працює система. Інженери, перед якими стоять задачі проектування високоякісних систем, в умовах невизначеності використовують методи та підходи синтезу робастних чи адаптивних систем.

Як відомо, адаптивні системи керування визначають закон керування на основі аналізу поведінки об'єкта при зміні його характеристик і збурень, що діють на нього [1]. Існує цілий ряд методів синтезу алгоритмів адаптації параметрів [2–3]. Деякі з них прості у реалізації, але при цьому можуть бути стійкими тільки при незначній зміні параметрів. Більше того, оскільки при побудові адаптивних систем її структура виходить нелінійною, вирішувати задачу стійкості буває досить складно. Розглянутий в [4] метод синтезу адаптивної системи з еталонною моделлю використовує функції Ляпунова для визначення алгоритму корекції керуючого впливу, чим забезпечує стійкість досліджуваній системі.

У роботі [4] описано алгоритм синтезу адаптивних систем з використанням пропорційних регуляторів для забезпечення в системі бажаної якості. Однак,

модельовання показало, що запропонований в [4] метод забезпечує якість перехідних процесів закладено в моделі тільки при незначній зміні коефіцієнта підсилення об'єкта керування.

Таким чином, аналіз опублікованих матеріалів дозволяє виділити наступний напрямок подальших досліджень, а саме розвиток можливостей синтезу адаптивних систем керування, які забезпечують швидко збіжність процесу в адаптивній системі з еталонною моделлю.

Основна частина. Як відомо, загальна структурна схема адаптивної системи має вид, який представлено на Рис. 1.

При зміні параметрів об'єкта керування контур самонастроювання з еталонною моделлю настраює параметри регулятора так, що динамічні характеристики всієї системи залишаються незмінними та близькими до характеристик еталонної моделі. Таким чином ціль адаптації описується як

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (y_m(t) - y_o(t)) = 0,$$

де $y_m(t)$ — вихід моделі; $y_o(t)$ — вихід об'єкта.

Для реалізації алгоритму роботи контура самонастроювання будується додатно визначена функція Ляпунова, яка забезпечує алгоритм зміни параметрів регулятора за виразом [1]:

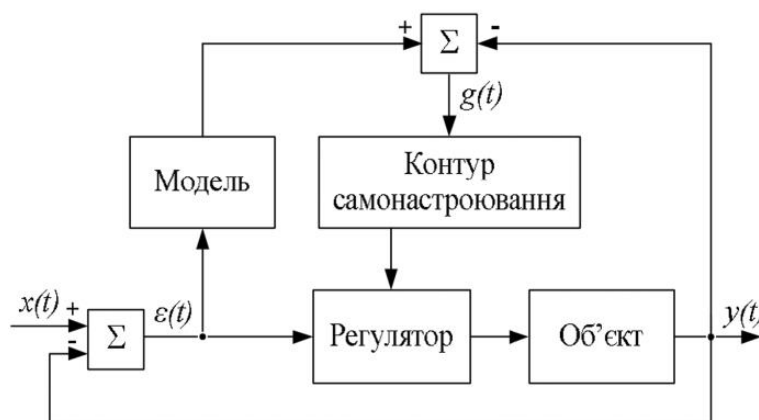


Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи

$$a = \frac{1}{k_o} \int g_2(t) \varepsilon(t) dt,$$

де a — параметр регулятора;

$g(t)$ — сигнал непогодження;

$\varepsilon(t)$ — помилка керування;

k_o — змінний коефіцієнт підсилення об'єкту керування.

У даній роботі, алгоритм синтезу, який запропоновано у [4] удосконалюється у двох напрямках. По-перше, використовується ПІД-контролер у прямому каналі керування для забезпечення швидкої збіжності процесу адаптації змінних характеристик об'єкту керування до характеристик моделі. При проведенні розрахунків контролерів можна використовувати, як мінімізацію оцінки ІТАЕ (англ.), так і інші методи,

при яких спостерігається адаптація на кінцевому проміжку часу. По-друге, використання такого підходу дозволило розширити різноманітність структур об'єктів керування, мається на увазі виконувати синтез адаптивної системи як для статичних, так і для астатичних систем.

Таким чином, процедура синтезу адаптивної системи складається з наступних етапів: розрахунок алгоритму зміни параметрів регулятора за наведеною формулою та розрахунок коефіцієнтів ПІД (ПІД)-контролерів.

Результати експериментальних досліджень. Для проведення експериментальних досліджень була вдосконалена модель адаптивної системи в прикладному пакеті Matlab/Simulink [4], яка представлена на Рис. 2.

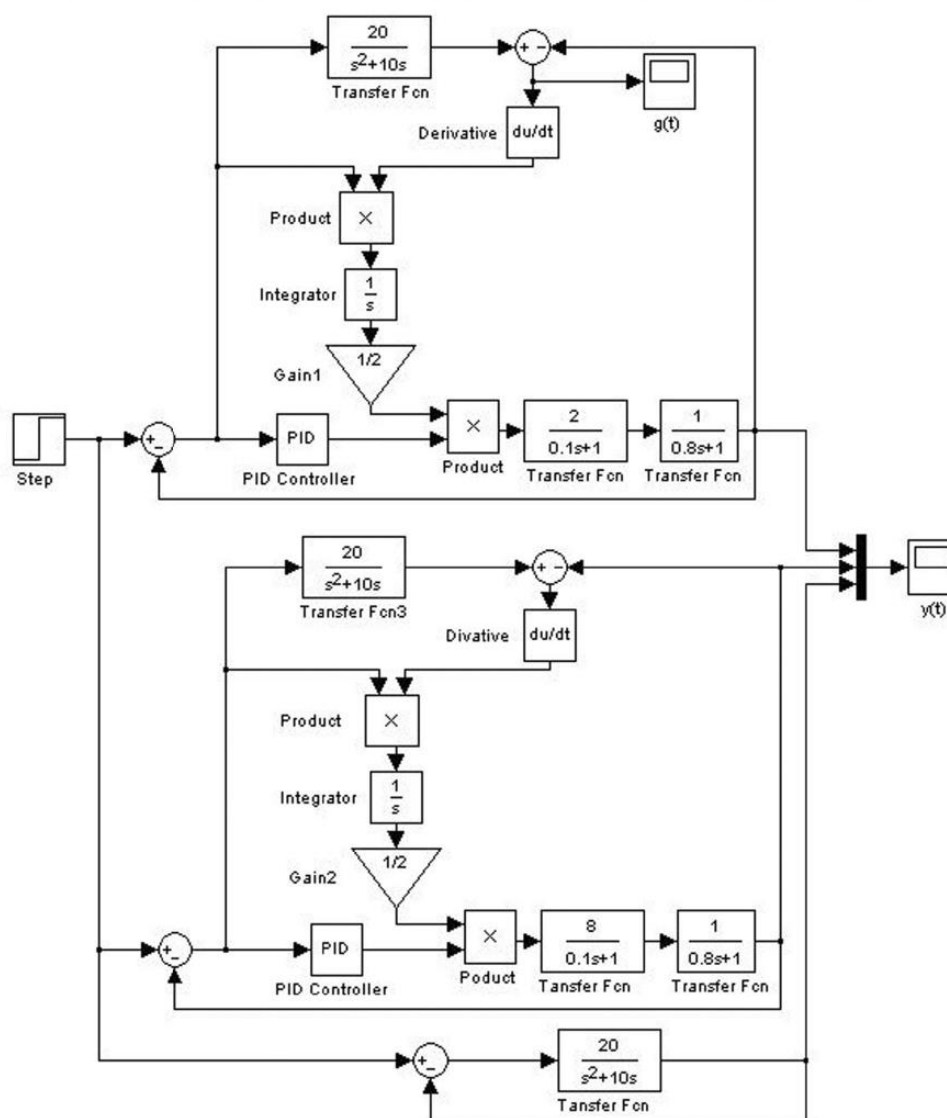


Рис. 2. Модель досліджуваної системи у пакеті Matlab/Simulink

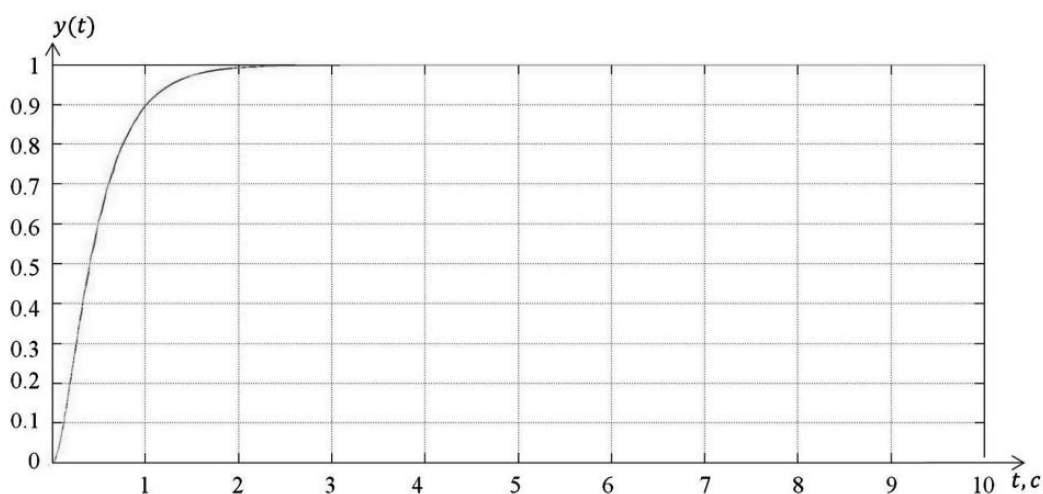


Рис. 3. Перехідні характеристики адаптивної системи

Таблиця 1

Результати моделювання

Δk	Без ПІД-регулятора		З ПІД-регулятором	
	Помилка адаптації до зміни k , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни k , %	Помилка адаптації до моделі, %
-1,8	36,2	52,2	0,090	0,105
-1,6	22,9	42,2	0,042	0,058
-1,4	16,1	37,1	0,024	0,040
-1,2	11,7	33,8	0,016	
-1	8,5	31,4	0,010	0,026
-0,8	6,1	29,6	0,006	0,022
-0,6	4,1	28,2	0,004	0,019
-0,4	2,5	27,0	0,002	0,017
-0,2	1,2	25,9	0,001	0,015
0	0	25,1	0	0,016
0,2	1,0	24,3	0,001	0,014
0,4	1,9	23,6	0,001	0,015
1	4,2	22,0	0,003	0,013
2	6,8	20,0	0,004	0,011
3	8,6	18,6	0,005	0,010
4	10,1	17,5	0,005	0,009
5	11,2	16,7	0,001	0,013
6	12,1	16,0	0,008	0,008
7	12,9	15,4	0,006	0,008
8	13,6	14,9	0,006	0,008
9	14,2	14,4	0,007	0,008

Ця модель дозволила виконувати експериментальні дослідження для будь-яких параметрів систем керування другого та третього порядків з попереднім визначенням структури та параметрів еталонної моделі.

Для підтвердження можливостей синтезу адаптивних систем керування запропонованим алгоритмом, розглянемо приклад синтезу для об'єкту

керування, який описується передавальною функцією вигляду:

$$W_o(s) = \frac{2}{(0.1s+1)(0.8s+1)}.$$

У якості еталонної моделі оберемо передавальну функцію виду:

Таблиця 2

Результати моделювання

Δk	Без ПД-регулятора		З ПД-регулятором	
	Помилка адаптації до зміни k , %	Помилка адаптації до моделі, %	Помилка адаптації до зміни k , %	Помилка адаптації до моделі, %
-2,7	40,4	56,8	0,488	0,483
-2,4	25,8	46,1	0,093	0,090
-2,1	18,1	40,6	0,024	0,027
-1,8	13,2	37,0	0,070	0,071
-1,5	9,6	34,4	0,080	0,082
-1,2	6,9	32,4	0,080	0,083
-0,9	4,7	30,8	0,069	0,071
-0,6	2,9	29,5	0,048	0,051
-0,3	1,3	28,4	0,025	0,030
0	0	27,4	0	0,020
0,3	1,2	26,6	0,026	0,026
0,6	2,2	25,8	0,049	0,051
0,9	3,1	25,2	0,071	0,073
1,2	3,9	24,6	0,090	0,092
1,5	4,7	24,0	0,103	0,105
1,8	5,4	23,5	0,111	0,112
2,1	6,0	23,1	0,114	0,119
2,4	6,6	22,6	0,115	0,113
2,7	7,1	22,2	0,111	0,115
3	7,7	21,9	0,100	0,103

$$W_m(s) = \frac{20}{s^2 + 10s}.$$

Забезпечення якості, закладеної в структуру і параметри еталонної моделі, у синтезованій адаптивній системі при зміні k_0 у межах $0,2 \leq k_0 \leq 11$ забезпечується введенням ПД-регулятора з наступними параметрами:

$$k_n = 1000, k_i = 300, k_d = 250.$$

Перехідні процеси представлені на Рис. 3 для випадку збільшення коефіцієнта підсилення у чотири рази.

Як видно з Рис. 3, синтезована адаптивна система забезпечує швидку збіжність процесу (1,5 с.) та адаптується до значної зміни коефіцієнта підсилення системи і забезпечує бажані показники якості, закладені в структуру і параметри еталонної моделі.

Результати моделювання для різних значень змінної складової коефіцієнта підсилення системи другого порядку Δk зведені у таблицю 1.

Разом із системою другого порядку проводились дослідження адаптивної системи третього порядку з передавальною функцією вигляду:

$$W_0(s) = \frac{3}{(0.3s+1)(0.1s+1)(0.8s+1)}.$$

Еталонна модель має наступну передавальну функцію:

$$W_m(s) = \frac{1.5}{s(0.1s+1)(0.05s+1)}.$$

Для забезпечення швидкої збіжності процесу адаптації змінних характеристик об'єкту керування до характеристик моделі використовується ПД-контролер з наступними параметрами:

$$k_n = 30, k_i = 10, k_d = 11.$$

Коефіцієнт підсилення змінюється у межах $0.3 \leq k_0 \leq 6$.

Результати моделювання для різних значень змінної складової коефіцієнта підсилення системи третього порядку Δk зведені у таблицю 2.

Висновки. У статті запропоновано алгоритм забезпечення швидкої збіжності процесу в адаптивній системі з еталонною моделлю за рахунок використання двох етапів адаптації: адаптації до зміни параметрів об'єкта керування з використанням функцій Ляпунова та адаптації до характеристик еталонної моделі за рахунок використання ПД-контролерів.

Проведенні дослідження показали, що запропонований алгоритм дозволяє синтезувати систему, яка адаптується до зміни коефіцієнта підсилення (у широких межах) у середньому з помилкою не більше 0.1%.

Література

1. Чураков Е. П. Оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие для вузов / Е.П. Чураков. — М.: Энергоатомиздат, 1987. 256 с.
2. Бейнарович, В.А. Самонастраивающиеся системы с эталонной моделью/В.А. Бейнарович// Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2010. № 1/21.
3. Есаков Виталий Анатольевич Синтез адаптивных систем методом функций Ляпунова / В. А. Есаков, В. Г. Дудко // Проблемы Науки. 2018. № 12 (132).
4. Репнікова Н.Б. Алгоритм синтезу самоналагоджувальних систем управління з моделлю / Н.Б. Репнікова, А.В. Писаренко, О.В. Лобода, А.М. Хомій // Системи обробки інформації, 2009. Вип. 2. С. 94–97.